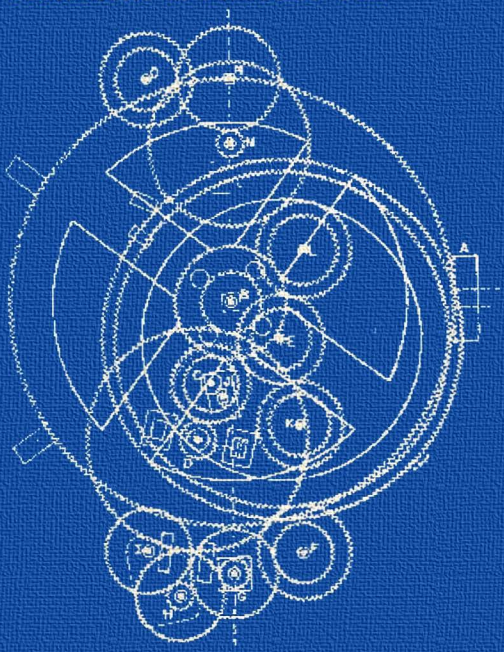
Filosofia

Lucio Russo
La rivoluzione dimenticata

Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna

Prefazione di Marcello Cini



Campi del sapere / Feltrinelli

Open Access

La serie "Filosofia" si occupa dei fondamenti delle scienze privilegiando la dimensione dell'agire che trova espressione nello spettro che va dall'epistemologia alla filosofia politica, all'etica. Si guarda non alla filosofia tradizionale ma a quella contemporanea tenendo conto delle proposte provenienti dalle più diverse aree di cultura. Il mondo d'oggi ha raggiunto un estremo grado di complessità e anche le categorie dell'indagine filosofica sono obbligate a ridefinirsi continuamente. "Campi del sapere/Filosofia" vuole mettere a disposizione strumenti per aprire un dialogo tra filosofia, scienze e società.

Lucio Russo
La rivoluzione dimenticata

Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna

Prefazione di Marcello Cini

Feltrinelli

Creative Commons

© Giangiacomo Feltrinelli Editore Milano
Prima edizione in "Campi del Sapere" novembre 1996
Terza edizione marzo 1997

ISBN 88-07-10210-2

Prefazione

di Marcello Cini

Io credo che questo libro di Lucio Russo sia paragonabile al tempo stesso a una sensazionale scoperta archeologica e a una importante teoria scientifica. Della prima condivide la sistematica opera di recupero, condotta con certosina pazienza, di una infinità di indizi, di testimonianze e di relitti che permettono di ricostruire le prove dell'esistenza di una civiltà sepolta, fornendone una rappresentazione animata e vivace. Della seconda condivide la lucida costruzione di una rete di ipotesi collegate fra loro da nessi logicamente ineccepibili che porta a conclusioni nuove e impreviste, contestabili soltanto sulla base di controdeduzioni altrettanto rigorose o di nuovi dati che alle premesse di partenza contrappongano altre premesse considerate più plausibili. Non è uno strano ibrido. È al contrario il risultato della duplice personalità del suo autore, che è al tempo stesso un matematico di grande valore e un profondo conoscitore della lingua e dei classici greci, oltre che della vastissima letteratura secondaria antica e moderna che di essi si occupa. È proprio questa originalissima miscela di competenze e di mentalità che ha permesso all'autore di vedere, nell'insieme di dati raccolti e di frammenti sparsi, un quadro d'insieme completamente diverso da quello tradizionale, secondo un riordinamento della *Gestalt* visiva, tipico, secondo la felice metafora proposta da Thomas Kuhn, di un mutamento di paradigma.

Le sue conclusioni non mancheranno di suscitare animate polemiche. Esse infatti contraddicono radicalmente la ricostruzione e la valutazione del periodo ellenistico condivise dalla grande maggioranza degli storici della civiltà greca, presentandone un'immagine che sovverte lo stereotipo trasmesso di generazione in generazione dalle istituzioni scolastiche alla cultura diffusa, per la quale l'ellenismo continua in genere ad apparire

un "periodo di decadenza", la cui eredità culturale è per noi assai meno essenziale di quella del periodo classico.

Lucio Russo dimostra, e scusate se è poco, che la nascita della "scienza moderna" va retrodatata di duemila anni, fino alla fine del IV secolo a.C., e che i due soli "scienziati" dell'antichità noti al vasto pubblico, Euclide e Archimede – il primo come esempio particolare delle capacità di astrazione di un pensiero greco dedito tuttavia soprattutto alla speculazione filosofica, e il secondo, oltre che per aver gridato *Eureka!* correndo nudo fuori dal bagno, come stravagante inventore di specchi ustori e di leve per sollevare il mondo – non furono isolati e incerti precursori di una forma di pensiero che soltanto nel XVII secolo d.C. sarebbe rigogliosamente fiorito. Furono al contrario due esponenti di spicco di una vasta schiera di raffinati e avanzatissimi scienziati – da Erofilo, fondatore della medicina scientifica, a Eratostene, il primo matematico che riuscì a fornire una misura straordinariamente precisa della lunghezza del meridiano terrestre, da Aristarco di Samo, ideatore dell'astronomia eliocentrica, a Ipparco, anticipatore della dinamica moderna e della teoria della gravitazione, da Ctesibio, abilissimo costruttore di strumenti meccanici e idraulici, al naturalista e filosofo Crisippo – dei quali al di fuori del nome si è persa quasi ogni traccia, protagonisti di una "rivoluzione scientifica" giunta a livelli di elaborazione teorica e di pratica sperimentale tali da far apparire a loro volta Galileo e Newton come apprendisti un po' confusi, anche se geniali, alle prime armi.

Affermazioni di questa portata sollevano subito interrogativi di vario genere. In primo luogo viene spontaneo domandarsi: perché, se il livello scientifico e tecnologico raggiunto dalla civiltà ellenistica è veramente stato quello descritto dal nostro autore, i Romani, con il loro senso pratico, non ne hanno ereditato, sviluppandole, le conquiste teoriche e pratiche nei secoli successivi? E ancora: come è possibile che tutti gli innumerevoli studiosi impegnati, a partire dal Rinascimento ma soprattutto negli ultimi due secoli, nel riportare alla luce ogni possibile traccia della cultura greco-romana, abbiano ignorato le testimonianze di questo straordinario fenomeno culturale e sociale, che avrebbe interessato l'intera area mediterranea per più di due secoli, riducendone la rilevanza alle dimensioni dell'occasionale comparsa di qualche artigiano ingegnoso o di qualche matematico geniale ma incapace di utilizzare le sue doti di astrazione per la conoscenza del mondo reale? E infine: come è accaduto che la scienza moderna abbia potuto ripercorrere a tentoni le stesse tappe del processo di sviluppo di una cultura nata in un contesto diverso duemila anni prima?

Alla prima domanda il libro risponde con più argomentazioni. Anzitutto sottolineando che la distruzione da parte dei Romani degli stati ellenistici, iniziata con la conquista di Siracusa e l'uccisione di Archimede nel 212 e conclusa con la distruzione di Corinto nel 146 a.C., ha portato anche a due secoli di oscurantismo e di ignoranza. Non bisogna confondere, ci mette in guardia il nostro autore, i Romani del III e II secolo a.C. con la civiltà di Virgilio e Orazio. La raffinata cultura di alcuni intellettuali romani fu resa possibile proprio dal contatto continuo con la civiltà ellenistica attraverso i Greci deportati come schiavi e i libri e le opere d'arte depredate. Occorsero però per questo diverse generazioni. Ma non basta. Anche quando, con l'innalzamento del livello culturale del "fero vincitore", gli scrittori romani di epoca imperiale come Plinio e Seneca arrivano a interessarsi alla lettura delle opere scientifiche ellenistiche, non riescono più a seguire la logica delle argomentazioni e si limitano a suscitare la meraviglia del lettore per le loro conclusioni inaspettate eliminando i nessi logici e sostituendoli con connessioni assolutamente arbitrarie.

Per capire a che livello di incomprensione avveniva la lettura di quegli antichi testi, basta citare un passo di Plinio, che dedica molte pagine a una descrizione della vita delle api. Il confronto con la spiegazione della forma esagonale delle cellette fornita successivamente da Pappo – che interpretando correttamente quei testi riferisce che le api risolvono un problema di ottimizzazione, in quanto tra i poligoni regolari con i quali si può pavimentare un piano, l'esagono è quello con il massimo rapporto area/perimetro, e pertanto è quello che permette di usare la minima quantità di cera a parità di contenuto di miele – mostra come Plinio sostituisse le complesse argomentazioni scientifiche originali con la spiegazione certamente più semplice, ma oltremodo fantasiosa che suona: "Ogni cella è esagonale, perché ognuna delle sei zampe dell'ape ha fatto un lato".

Una seconda ragione, strutturale, del disinteresse dei Romani per le conoscenze scientifiche e le realizzazioni tecnologiche della civiltà ellenistica, e della loro incapacità di comprenderle, sta nella profonda diversità delle rispettive basi economico-produttive. Con la conquista romana cessò, infatti, il rapporto fra scienza e politica, fallì cioè l'idea dei primi sovrani ellenistici di usare la scienza come strumento di potere; a questo scopo si rivelarono ben più efficienti l'organizzazione militare e il diritto.

Il confronto fra Alessandria all'apice del suo fulgore e la Roma imperiale è estremamente significativo. Alessandria, fondata nel 331 a.C., divenne rapidamente la maggiore e più ricca città del mondo conosciuto, e tale rimase anche durante i primi se-

coli della dominazione romana. La costruzione nel 280 a.C. del Faro, un'opera di alta tecnologia che richiese la costruzione di specchi parabolici capaci di renderne la luce visibile a una cinquantina di chilometri, documenta l'intensità dei traffici marittimi dei quali la città era il centro. Per di più, esistono indizi molteplici che questa ricchezza fosse soprattutto dovuta alla vendita in altri paesi dei prodotti delle sue industrie, che esportavano ovunque farmaci, unguenti, profumi, coloranti, tessuti, oggetti di vetro e metallo, carta di papiro, tutte merci di contenuto tecnologico elevato.

Inoltre, nell'Egitto tolemaico non erano impiegate grandi masse di schiavi: la schiavitù era essenzialmente limitata all'ambito domestico. La tesi corrente secondo la quale la presenza della schiavitù "nell'Antichità" toglieva ogni interesse al progresso tecnologico è dunque smentita da questi fatti per quanto riguarda la società ellenistica. Vale, al contrario, per Roma, che era una città parassita, come risulta sia da un esame dell'interscambio commerciale (giungono nel porto di Ostia navi colme di prodotti da tutto l'impero, ma non riparte praticamente nulla), che dall'altissimo livello della disoccupazione durante tutto il periodo imperiale. Uno degli aneddoti più citati a questo proposito riguarda l'imperatore Vespasiano, che rifiutò l'installazione di un paranco idraulico dicendo di non voler togliere lavoro al popolino romano. Sembra dunque corretto affermare che allo stretto rapporto fra scienza, tecnologia ed economia che caratterizza la civiltà alessandrina, corrisponde l'accompagnarsi dell'estraneità di Roma per la cultura scientifica con la natura parassitaria della sua economia. Queste considerazioni rispondono in parte anche alla seconda domanda. A causa del disinteresse dei conquistatori per la cultura scientifica e tecnologica della società alessandrina la maggior parte dei testi originali dei suoi scienziati andò perduta. Molte delle loro teorie e dei risultati delle loro ricerche furono ripresi, riprodotti e riassunti da autori dell'epoca imperiale, molti dei quali non avevano più la possibilità di comprendere fino in fondo gli algoritmi, i ragionamenti e i calcoli che erano stati impiegati, né di ripetere gli esperimenti sui quali quei risultati si fondavano o ne erano convalidati. Così, ad esempio, nel II secolo d.C., il più celebre astronomo dell'antichità, Tolomeo, utilizza, dopo qualche secolo di completa cessazione di ogni attività scientifica, i dati osservativi dei suoi predecessori Aristarco e Ipparco, senza più essere in grado di ricalcolare i valori dei parametri da essi utilizzati, che nel frattempo, con il trascorrere del tempo, erano cambiati. In modo analogo si può affermare che la tecnologia descritta da Erone di Alessandria, vissuto nel primo secolo d.C., che comprende una quantità di dispositivi come viti, cre-

magliere, ingranaggi moltiplicatori, catene di trasmissione, eliche, stantuffi e vari tipi di valvole, e utilizza fonti di energia come quella idraulica, eolica e il vapore, è molto probabilmente una compilazione tratta da opere ellenistiche precedenti di almeno due o tre secoli.

Insomma, si può dire che la maggior parte delle testimonianze sulle opere scomparse, redatte molti secoli dopo, risultano gravemente inadeguate, perché incomplete, approssimative e spesso male interpretate. La selezione dei posteri ha successivamente privilegiato le compilazioni o comunque le opere scritte in un linguaggio ancora comprensibile nella tarda Antichità e nel Medio Evo, quando la civiltà era regredita al livello prescientifico. Questo fatto ha contribuito non poco alla "rimozione" dell'ellenismo da parte della cultura moderna. È accaduto infatti che gli studiosi dell'Antichità, appartenenti nella stragrande maggioranza all'area della cultura umanistica e dunque privi degli strumenti concettuali per analizzare criticamente i testi rimasti, hanno attribuito ai protagonisti della rivoluzione scientifica della civiltà ellenistica il livello relativamente basso degli scritti dei loro epigoni e divulgatori, riducendo la statura intellettuale dei primi rispetto alle altezze raggiunte dal pensiero speculativo del periodo classico. La tradizionale separazione fra le "due culture" ha completato il giudizio corrente che vede il periodo ellenistico come un periodo di "decadenza" rispetto all'apogeo raggiunto dalla filosofia nei due secoli precedenti.

Alla terza domanda Russo risponde semplicemente che la nascita della scienza moderna non è stata né indipendente né casuale. Anzi, i "moderni" non fecero altro, all'inizio, che gradatamente riappropriarsi di conoscenze via via riportate alla luce dal ritrovamento di manoscritti greci, arabi e bizantini importati in Italia dal crescente flusso di traffici commerciali e culturali. "Gli intellettuali rinascimentali," scrive Russo, "non erano in grado di capire le teorie scientifiche ellenistiche, ma come bambini intelligenti e curiosi che entrano per la prima volta in una biblioteca, erano attratti dai singoli risultati e in particolare da quelli illustrati nei manoscritti con disegni; ad esempio, in ordine casuale: le dissezioni anatomiche, la prospettiva, gli ingranaggi, le macchine pneumatiche, la fusione di grosse opere in bronzo, le macchine belliche, l'idraulica, gli automi, la ritrattistica 'psicologica', la costruzione di strumenti musicali."

Il più famoso tra gli intellettuali attratti da tutte queste "novità" è Leonardo da Vinci, che riuscì a mettere in pratica, utilizzando le sue straordinarie doti di pittore e di osservatore, alcune delle idee contenute negli antichi testi: dallo studio dell'anatomia con la dissezione dei cadaveri a quello delle opere idrauliche. Tuttavia i disegni di Leonardo raffigurano in genere oggetti

irrealizzabili ai suoi tempi perché mancava la tecnologia corrispondente. Ma non di una eccezionale capacità di anticipazione si tratta, ma semplicemente del fatto che all'origine di quei disegni vi erano altri disegni, risalenti a un'epoca in cui la tecnologia era stata ben più avanzata.

Lo stesso Copernico aveva ben chiaro che la sua teoria eliocentrica era una ripresa dell'ipotesi di Aristarco. Ma egli fece di più: riprese anche la teoria policentrica della gravità (capace di spiegare la forma sferica di Terra, Sole, Luna) riferita da Plutarco, superando quella aristotelica. La "rivoluzione copernicana" fu dunque più una battaglia culturale, condotta con l'aiuto delle conoscenze più avanzate dell'Antichità contro la cosmologia che la cultura medievale aveva elaborato sulla base del sistema tolemaico, che non una "scoperta" scientifica autonoma e originale.

La tesi di Russo va però assai più in là. Anche la rivoluzione scientifica del XVII secolo sarebbe stata essenzialmente la riscoperta di quella di duemila anni prima. Per dimostrare il suo assunto egli analizza l'opera dei suoi due protagonisti principali, Galileo e Newton, rintracciandovi numerosi legami con quella degli antichi scienziati. "Poiché Galileo [...] viene presentato spesso come il fondatore di un metodo nuovo, quasi senza precedenti storici," egli scrive, "va sottolineato che in Galileo l'obiettivo di recuperare la scienza ellenistica è del tutto chiaro ed esplicito." Un obiettivo che riprende dai suoi lontani maestri sia l'idea del metodo sperimentale che quella del metodo dimostrativo. "Manca però ancora in lui," egli aggiunge, "la capacità di usare i più raffinati strumenti matematici ellenistici. Egli infatti, mentre è in grado di usare il metodo dimostrativo euclideo e l'algebra geometrica, non riesce ancora a comprendere del tutto (come del resto non riuscirà nessun altro dopo di lui ancora per più di due secoli) il cosiddetto 'metodo di esaustione' e la teoria delle proporzioni."

Ancora più approfondita è l'analisi critica dell'opera di Newton. Quest'analisi mette in evidenza la contraddizione fra la "debolezza metodologica" dei fondamenti della teoria della gravitazione e l'effettiva evoluzione della dinamica newtoniana verso una teoria coerente al suo interno, utilizzabile subito come modello di moti reali, in particolare di quello dei pianeti. Secondo Russo, infatti, quei fondamenti sono soltanto un eclettico tentativo di utilizzare un ordine espositivo assiomatico-deduttivo non come base di una "teoria scientifica" nel senso di Euclide e di Archimede, ma per sviluppare una filosofia della natura basata su concetti aristotelici. Questa contraddizione si spiegherebbe con la sostanziale coerenza, assicurata da una preesistente comune origine, fra i diversi elementi metodologici, concettuali

e osservativi mutuati da Newton dalle fonti ellenistiche a sua disposizione. "Le affermazioni genuinamente aristoteliche," scrive ad esempio Russo, "pur se inserite da Newton sin dall'inizio dell'opera, non potevano alterare la dimostrazione di teoremi della teoria delle coniche effettuate secondo il modello di Apollonio." D'altra parte, la stessa legge "newtoniana" della gravitazione, cioè la legge della dipendenza della forza dall'inverso dei quadrati delle distanze, è riferita da Newton stesso come una conoscenza pitagorica.

Nonostante fosse basata da una parte sulla scienza ellenistica, e dall'altra sulla riflessione circa prodotti tecnologici aventi anch'essi in larga misùra la stessa origine, la scienza moderna raggiunse tuttavia abbastanza rapidamente una fase in cui appare molto più "potente". Perché? Russo elenca alcune plausibili ragioni tecniche. Ad esempio il sopravvento acquistato dal calcolo numerico sui metodi geometrici grazie all'uso delle tavole dei logaritmi, pubblicate per la prima volta nel 1614. L'idea, anch'essa, non era nuova, perché era già stata formulata lucidamente da Archimede. Ma, e qui il ragionamento si allarga alla sfera sociale, nuova era la domanda di questo nuovo strumento di calcolo, derivante dall'allargamento del numero degli utilizzatori dei metodi scientifici. "Gli elementi di superiorità della scienza moderna," conclude l'autore, "non sembrano poggiare su idee radicalmente nuove, ma piuttosto sul fatto che elementi dell'antica cultura hanno avuto di nuovo nell'Europa moderna la possibilità di interagire e di svilupparsi, con il vantaggio di potersi avvalere di una base sociale molto più ampia, che permetteva di disporre di una quantità di dati molto più vasta."

Queste, per sommi capi, alcune delle principali argomentazioni svolte nel libro, che a uno come me, curioso di storia della scienza, ma profano in questo genere di studi, appaiono non solo convincenti, ma anche straordinariamente lucide. I lettori e gli studiosi dell'argomento dal canto loro giudicheranno le tesi del libro e valuteranno le prove che le sostengono. Voglio tuttavia, prima di terminare, aggiungere alcune considerazioni sulle premesse di carattere epistemologico che Lucio Russo espone nelle prime pagine. Qui infatti mi sembra utile confrontare le mie posizioni con le sue.

Nel definire ciò che egli intende per "scienza", allo scopo di porre su basi salde la sua tesi secondo cui nel caso della scienza ellenistica di vera "scienza" si tratta, l'autore tenta di stabilire una demarcazione netta fra "scienza" e credenze non scientifiche. Non è un compito facile, come ben sanno gli epistemologi che si accapigliano su questa questione da quasi un secolo, e francamente mi sembra che Russo abbia risolto la questione più da matematico che da epistemologo. Egli effettua, infatti, al-

cune operazioni di assiomatizzazione che in primo luogo restringono il campo della scienza in generale a quello della "scienza esatta", e in secondo luogo riducono quest'ultima all'insieme delle "teorie scientifiche" che vengono definite mediante tre postulati. Il primo è che "le affermazioni della teoria non riguardano gli oggetti del mondo reale, ma enti specifici della teoria considerata"; il secondo è che "la teoria ha una struttura rigorosamente deduttiva; è basata cioè su pochi enunciati fondamentali ('assiomi', 'postulati' o 'principi') sugli enti della teoria e un metodo unitario e universalmente accettato per dedurne un numero illimitato di conseguenze"; il terzo è che "la teoria è applicabile al mondo reale mediante delle 'regole di corrispondenza' tra gli enti della teoria e gli oggetti concreti".

La grande utilità della "scienza esatta", secondo l'autore, consiste nel fornire "modelli" del mondo reale all'interno dei quali esiste un metodo garantito per distinguere le affermazioni false da quelle vere. Inoltre le "teorie scientifiche", anche se nascono come modelli di fenomeni naturali, per la possibilità che hanno di autoestendersi con il metodo dimostrativo, divengono in genere modelli di settori di attività tecnologica. Dunque "la 'tecnologia scientifica', caratterizzata dall'avvalersi di una progettazione effettuata all'interno delle 'teorie scientifiche', appare così intrinsecamente legata alla stessa struttura metodologica della scienza esatta e non può che nascere con questa".

Esistono anche, ammette Russo, "scienze empiriche" accomunabili in qualche misura alla scienza esatta, che non soddisfano al secondo postulato perché ad esse manca la struttura rigorosamente deduttiva che la caratterizza. Tuttavia è quest'ultima l'unica scienza nel vero senso della parola, e sbaglia chi, come Kuhn, usando un concetto di "paradigma" molto più ampio di quello di "teoria scientifica" fa rientrare nella categoria "scienza" forme di conoscenza, quali la matematica pitagorica, la fisica aristotelica o varie teorie medievali, che sono escluse dalla definizione che abbiamo visto sopra.

Ebbene, non ho difficoltà ad ammettere di essere fra coloro ai quali, come prevede l'autore al termine di questa premessa epistemologica, "la definizione di scienza proposta sarà apparsa troppo restrittiva". Non è d'altra parte questa la sede per discutere in dettaglio le ragioni di questa differenza di punti di vista, anche perché ho avuto modo di esporre in più occasioni e da molti anni le mie idee sulla scienza. In sostanza, il mio timore è che una assiomatizzazione della definizione di scienza ne faccia un'attività isolata dal suo contesto storico e dunque, invece di facilitarla, renda più difficile la ricerca delle risposte alle domande fondamentali dei giorni nostri: dove va la scienza? O, se

si vuole, come e dove si compiono le scelte sulle vie da percorrere? O, ancora, qual è il ruolo della società e della sua storia nel processo di crescita delle conoscenze scientifiche (e viceversa)?

Fortunatamente – se posso permettermi una notazione amichevolmente scherzosa – Lucio Russo predica male (dal mio punto di vista) e razzola bene. Detto in termini più seri, la lettura del libro dimostra che la sua definizione gli serve più a introdurre categorie che permettano di mettere in evidenza quanto l'attività degli scienziati ellenistici avesse in comune con quella degli scienziati moderni e contemporanei, che non a istituire una demarcazione assoluta fra scienza e non scienza. Nella sua ricostruzione infatti il contesto storico è ampiamente analizzato e gioca un ruolo fondamentale, il nesso tra teoria e pratica non è a senso unico ma articolato e complesso, il panorama delle diverse discipline mostra al tempo stesso l'unità del clima culturale che le sottende e la diversità dei fini e dei metodi adottati.

Non a caso, con un pizzico di provocazione, ho sottolineato all'inizio che, secondo me, questo libro è un perfetto esempio di rivoluzione scientifica kuhniana nel campo della storia della scienza. Sarebbe un peccato che, utilizzando le sue troppo restrittive categorie, proprio l'autore fosse costretto a non riconoscerlo come un contributo scientifico di primissimo ordine.

Introduzione

L'idea di questo lavoro nasce dalla convinzione che il pensiero scientifico greco, oggi conosciuto da pochi specialisti e per lo più trascurato non solo dal grande pubblico ma anche da classicisti, storici e scienziati, sia in realtà di grande interesse generale per almeno tre ragioni.

In primo luogo, lo studio della "rivoluzione scientifica",[1] cioè della nascita del metodo scientifico (che avviene essenzialmente, è questa una delle tesi qui sostenute, nel primo ellenismo), è indispensabile per la comprensione della "civiltà classica".

In secondo luogo l'esame del ruolo svolto dalla scienza nella civiltà ellenistica è essenziale per la comprensione di alcune questioni di capitale importanza per la storiografia, quali il ruolo di Roma, i motivi della decadenza della vita urbana e della tecnologia nel Medio Evo, l'originalità, le caratteristiche e i limiti della "Rinascita scientifica" moderna.

Il terzo e principale motivo di interesse della scienza ellenistica è costituito però dalla sua rilevanza per alcuni problemi attuali. Una migliore comprensione della scienza classica e dei suoi rapporti con la scienza moderna può far luce, in particolare, sulla struttura interna della scienza, i suoi rapporti con la tecnologia e gli altri aspetti della civiltà, l'origine e il possibile superamento dell'attuale frattura tra cultura umanistica e cultura scientifica. Ma ciò che rende oggi particolarmente attuale lo studio della scienza antica, e allo stesso tempo spiega la scarsa considerazione in cui è stata tenuta negli ultimi due secoli, è la sua tragica fine. L'idea, ingenua e pericolosa, di un progresso

[1] Lo stesso termine è stato usato al plurale da Kuhn in un significato completamente diverso (cfr. [Kuhn SSR]). Le *rivoluzioni scientifiche* di Kuhn sono infatti interne alla scienza e consistono nel cambiamento del quadro concettuale relativo a un suo particolare settore.

continuo e automatico dell'umanità, assicurato in particolare dallo sviluppo scientifico, ha potuto infatti affermarsi solo a patto di nascondere l'antica sconfitta della scienza. Oggi che queste pericolose illusioni sembrano cadute è venuto meno il principale ostacolo a una corretta ricostruzione storica.[2] D'altra parte chi è interessato a difendere la razionalità scientifica dagli attacchi che sempre più ne mettono in forse il futuro deve essere consapevole che si tratta di una battaglia che un giorno è stata già perduta, con conseguenze millenarie su tutti gli aspetti della civiltà.

Questo libro, pur dedicando notevole spazio alla descrizione di alcuni aspetti della scienza ellenistica, intende occuparsi non tanto di "storia della scienza" quanto di "storia".

Poiché non può esistere una specializzazione in "civiltà umana" gli storici hanno sempre dovuto, del resto, basare il proprio lavoro sulla scelta di un particolare settore, come chiave per interpretare la Storia. Il ruolo dominante è stato assegnato per secoli alla storia diplomatico-militare, più raramente alla storia dell'economia o alla storia dell'ideologia. Nel caso della storia romana, non a caso, il punto di partenza è stato a volte la storia del diritto. Più di recente, grazie soprattutto alla scuola francese, è stata considerata fondamentale la storia della "civiltà materiale", cioè, essenzialmente, della tecnologia. Mentre però le civiltà prescientifiche sono definite, in larga misura, dalla loro tecnologia, quando, con la rivoluzione scientifica, la tecnologia comincia ad essere un frutto cosciente della scienza, i due aspetti si intrecciano in modo inseparabile e la scienza assume un ruolo molto importante anche nell'autocoscienza della civiltà.

Nel caso dell'ellenismo può avere quindi qualche utilità l'esperimento, qui tentato, di guardare a quella civiltà partendo dall'esame della sua scienza. In particolare, dopo un primo capitolo dedicato a una discussione preliminare del problema della "nascita della scienza", cominceremo con la descrizione di alcune caratteristiche fondamentali della matematica ellenistica, che, essendo la prima "vera matematica" e il primo modello sto-

[2] Un importante contributo contro la concezione del progresso automatico è venuto in questo secolo da Karl Popper (cfr. in particolare [Popper PH], [Popper OSE]). Un facile ottimismo sul futuro dell'umanità ha continuato però ad essere condiviso da molti, almeno fino a pochi anni fa. Un residuo resistente di questa pericolosa fede è nella diffusa abitudine degli studiosi di usare e citare nei propri lavori quasi esclusivamente pubblicazioni recentissime, come se l'essere *aggiornati* fosse di per sé una garanzia di qualità. In questo modo si assicura la subitanea diffusione di qualsiasi moda culturale, accelerando il progresso ma anche l'eventuale regresso delle conoscenze. Avremo occasione di vedere molti esempi del secondo fenomeno, sia nell'antichità che ai nostri tempi.

rico di "scienza", ha mostrato di essere, se non altro, uno dei prodotti culturali ellenistici più durevoli. Dopo un rapido esame sia delle altre "scienze esatte" che delle "scienze empiriche", diretto soprattutto all' individuazione delle principali caratteristiche metodologiche comuni, tuttora alla base del nostro metodo scientifico, se ne mostrerà il rapporto con la tecnologia e con alcuni altri aspetti della civiltà ellenistica.

Un breve capitolo è dedicato alla fine della scienza antica e un altro, più ampio, al tentativo di ricostruire sulla base di fonti indirette alcune delle idee scientifiche non documentate nei trattati conservati.

Con il capitolo dedicato al recupero del metodo scientifico si affronta il tema del rapporto tra scienza classica e scienza moderna. La principale tesi sostenuta è che una radicale rivalutazione dell'influenza della prima sulla seconda sia essenziale non solo per una corretta ricostruzione storica dello sviluppo delle idee ma anche per la comprensione della metodologia scientifica.

Poiché l'argomento di questo saggio interseca numerosi ambiti specialistici diversi, non è stato possibile, senza appesantire troppo la mole del lavoro, offrire una guida alla letteratura esistente. Ho scelto di indicare innanzitutto le fonti sulle quali il lavoro è basato. La (poca) letteratura secondaria citata è stata scelta con un criterio duplice. Alcuni lavori sono citati perché considerati particolarmente importanti o perché, comunque, mi sono stati particolarmente utili (o, a volte, per rimandare a una bibliografia su un argomento specifico); spesso la citazione ha invece lo scopo di esemplificare opinioni diffuse; in questo secondo caso non ho scelto i lavori a mio avviso migliori, ma quelli più rappresentativi, appunto, per la loro diffusione (mi riferisco, ad esempio, a opere come la *Cambridge Ancient History* o la *History of Technology* pubblicata a Oxford; in un paio di casi ho usato l'*Enciclopaedia Britannica*). Gli elenchi delle fonti e delle abbreviazioni bibliografiche sono alla fine del libro.

Un'avvertenza: i vari paragrafi non sono indipendenti tra loro, come i titoli potrebbero a volte erroneamente suggerire. Essi, nell'ordine in cui sono, cercano di costruire un discorso unitario, sviluppato su più piani. In altre parole questo è un saggio e non un manuale di consultazione.

Ringraziamenti

Probabilmente non avrei portato a termine questo lavoro se non avessi avuto il sostegno di due maestri della filologia classica: Carlo Gallavotti, che diversi anni fa lesse i miei primi lavori sulla scienza ellenistica e con il suo giudizio mi fornì un incoraggiamento essenziale, e Bruno Gentili, nel quale ho trovato un prezioso alleato negli anni successivi.

Mentre le tesi di questo saggio prendevano forma ho avuto più volte l'occasione di insegnare il corso di *Storia delle matematiche*; il mio lavoro deve molto all'entusiasmo e all'intelligenza degli studenti che si sono appassionati a problemi lontani dalle mode culturali, cogliendone la rilevanza e la profonda attualità.

Sono grato a Marcello Cini per l'attenzione con cui ha letto il manoscritto, per alcuni commenti e per averlo segnalato all'editore Feltrinelli.

Molti colleghi e amici che hanno letto versioni preliminari di queste pagine o gli articoli in cui ho anticipato alcune delle tesi qui esposte hanno fornito giudizi, suggerimenti e critiche. Da tutte le loro reazioni ho avuto qualcosa da imparare, ma desidero ringraziare in particolar modo Donatella Capocaccia, Giovanni Ciccotti, Ferdinando Degan, Henri Epstein, Giorgio Fusco, Giovanni Gallavotti, Alberto Gandolfi, Sandro Graffi, Mario Iannuzzi, Giovanni Jona-Lasinio, Marco Lippi, Gabriele Lolli, Enzo Olivieri, Luigi Radicati, Archie Roy e Giovanni Stelli.

1. La nascita della scienza

1.1. *La rimozione della rivoluzione scientifica*

Poiché è generalmente riconosciuto il ruolo centrale svolto dalla scienza nella nostra civiltà, si potrebbe credere che la sua nascita, cioè la rivoluzione scientifica, sia considerata un nodo fondamentale della storia umana. L'importanza di questo avvenimento non è invece quasi mai percepita. In genere le storie del pensiero scientifico, stemperando le differenze tra la scienza ellenistica, le conoscenze prescientifiche delle antiche civiltà egiziana e mesopotamica e la filosofia naturale della Grecia classica, riescono a nasconderla. Nei libri di storia antica, poi, l'avvenimento è di solito accuratamente taciuto. Il più delle volte vi si dice solo che l'ellenismo fu un periodo in cui fiorirono alcune "scienze". Si possono trovare in genere più notizie su Archimede o Aristarco di Samo in un libro sul Rinascimento, a proposito della loro riscoperta, che non in un libro sulla civiltà classica.

Lo studioso dell'età moderna pensa al Rinascimento o al Seicento con lo sguardo rivolto al futuro, verso la civiltà attuale. Non può quindi ignorare l'importanza della "Rinascita della scienza". Lo studioso dell'Antichità è invece spesso portato (soprattutto nel passato, per la verità) a confrontare l'ellenismo o con la supposta perfezione della Grecia classica o con Roma. Rischia così di giudicarlo o con il metro di una civiltà precedente o con quello di una civiltà sostanzialmente estranea; in ambedue i casi dal punto di vista di civiltà prescientifiche.

Il risultato è stato da una parte che i più sono indotti a far coincidere la nascita del metodo scientifico con quello che pure, non a caso, si chiama il "Rinascimento scientifico" e dall'altra che fino al secolo scorso la civiltà che ci ha dato la scienza non era considerata neppure degna di un nome: si trattava semplicemente di un "periodo di decadenza" della civiltà greca.

Droysen fu il primo storico che cercò di rivalutare questo periodo straordinario, dandogli anche un nome, nella sua *Storia dell'ellenismo* (1833-1843). Anche se dopo Droysen altri storici hanno tentato più volte analoghe "rivalutazioni" e anche se negli ultimi tempi molte cose sono diventate più chiare (ad esempio l'influenza di Archimede su Galileo è sempre più sottolineata e si possono trovare delle opere molto interessanti su diversi aspetti della civiltà ellenistica [1]), mi sembra che si resti nell'ambito di contributi specialistici, senza che il quadro d'insieme sia mutato granché all'occhio del non specialista, per il quale l'ellenismo continua spesso ad apparire, sostanzialmente se non esplicitamente, un "periodo di decadenza", un periodo, cioè, la cui eredità culturale è per noi meno essenziale di quella del periodo classico.

Sembra in realtà che nella coscienza storica collettiva vi sia una forma di rimozione dell'ellenismo e in particolare della rivoluzione scientifica sviluppatasi nel III secolo a.C. La nostra cultura, basata essenzialmente da una parte sulla storia e dall'altra sulla scienza, ricorre infatti a vari espedienti pur di nascondere a se stessa l'importanza storica della nascita della scienza.

Consideriamo tre dei maggiori esponenti della rivoluzione scientifica: Euclide di Alessandria, Archimede di Siracusa ed Erofilo di Calcedonia. Cosa sa di loro l' "uomo colto" moderno?

Di Erofilo, nulla. [2] Di Archimede ricorda che faceva cose strane: correva nudo gridando *Eureka!*, immergeva corone nell'acqua, disegnava figure geometriche mentre stavano per ucciderlo, e così via. L'aneddotica infantile coagulata intorno alla sua figura, congiunta alla scarsissima diffusione delle sue opere, accomunano Archimede più ai personaggi del mito o della leggenda che ad altri pensatori. Il risultato è di ricordarlo sì, ma come un personaggio leggendario, al di fuori della storia. Non è un caso che Archimede sia il nome italiano del personaggio di Walt Disney amico di Paperino. Riuscireste a immaginare un Platone, un Leibniz o un Cartesio tra i cittadini di Paperopoli? Si finisce col dimenticare che si tratta di uno scienziato di cui sono ancora disponibili molti scritti e i cui risultati continuano ad esserci trasmessi lungo tutto l'arco degli studi, da quando alla scuola elementare impariamo la formula per calcolare il volume della sfera a quando all'università studiamo la

[1] Alcune di queste saranno citate in seguito. Qui ricordiamo solo che tra le opere di ampio respiro sull'ellenismo è ancora fondamentale [Rostovzev SESME] e che per quanto riguarda in particolare Alessandria una miniera di informazioni (soprattutto una utilissima raccolta di testimonianze) è in [Fraser].

[2] Cfr. il prossimo cap. 5.

meccanica e l'analisi matematica, che nacquero in buona parte nelle sue opere.

La geometria euclidea è rimasta l'ossatura dell'insegnamento matematico di base.[3] Anche Euclide viene però avulso dalla storia. Nel suo caso si usa il meccanismo opposto a quello usato per Archimede: invece di respingerlo nella leggenda e nell'aneddotica egli viene privato di ogni connotazione storica, ipostatizzando la "geometria euclidea" come se si trattasse di un dato a disposizione dell'umanità da sempre. Se non siete convinti di questa affermazione provate a chiedere ai vostri amici in quale secolo è vissuto Euclide. Ben pochi risponderanno esattamente, pur avendo studiato "geometria euclidea" per diversi anni.[4] Eppure Euclide è stato uno degli autori più letti nella storia dell'umanità; la sua opera più famosa, gli *Elementi*, è stata studiata direttamente con continuità per ventidue secoli: dal 300 a.C. alla fine del XIX secolo. Credo che di nessun altro autore così studiato (anche se oggi non più di prima mano) si sappia in genere così poco.

Un altro dei meccanismi con cui avviene la rimozione dell'ellenismo e in particolare del secolo del massimo sviluppo scientifico, il III secolo a.C., consiste nell'attribuirne i risultati, in particolare scientifici o tecnologici, ad "Antichi" non meglio specificati. Fateci caso: si dice sempre che il diametro della Terra era stato misurato nell' "antichità", che "gli Antichi" avevano scoperto il principio della spinta idrostatica, che l'organo risale all' "antichità", che nell' "antichità" vi era stato un "precursore" di Copernico. Più avanti capiterà di fare molti altri esempi. Sbaglieremo raramente adottando la seguente "regola": gli "Antichi" sono vissuti nel III secolo a.C., nella parte ellenizzata del Mediterraneo.

La difficoltà che si prova nel tentare di inquadrare storicamente fatti e personaggi del III secolo a.C. è strettamente connessa alla nostra profonda ignoranza di questo periodo, che è stato quasi cancellato dalla storia.

In primo luogo, infatti, non ci è rimasto alcun resoconto storico continuato tra il 301 a.C. (data alla quale si interrompe la parte rimastaci dell'opera di Diodoro Siculo[5]) e il 221 a.C. (inizio delle *Storie* di Polibio). Non solo non abbiamo le opere sto-

[3] Essendo falliti i tentativi di basare l'insegnamento su sistemi assiomatici privi di contenuto geometrico, oggi in realtà è sempre più diffusa la tendenza a non insegnare affatto nelle scuole secondarie il metodo dimostrativo; non credo però che sia giusto qualificare un tale insegnamento come "matematico".

[4] Questo, almeno, è stato il risultato di una piccola indagine personale tra amici e colleghi.

[5] A tale data, infatti, termina la narrazione del XX libro della *Bibliotheca historica*; dei libri successivi abbiamo solo frammenti.

riche ellenistiche, ma anche dell'opera di Tito Livio ci manca la seconda deca, che riguardava il periodo dal 292 al 219 a.C. Forse non è un caso. La tradizione ci ha conservato la storia della Grecia classica e quella dell'ascesa di Roma, dei periodi cioè che rimasero un punto di riferimento culturale nel tardo periodo imperiale e nel Medio Evo. La storia del secolo della rivoluzione scientifica è stata dimenticata con il ritorno della civiltà a uno stadio prescientifico.

In secondo luogo quasi tutti gli scritti dell'epoca si sono perduti. La civiltà che tra le tante conquiste intellettuali ci ha lasciato anche l'idea stessa delle biblioteche e della gelosa conservazione del pensiero del passato è stata cancellata con le sue opere. Le poche opere scientifiche rimaste ci sono state trasmesse da Bizantini e Arabi. L'Europa non aveva conservato nulla. Qualcosa si è recuperato per fortuna nel nostro secolo: pochi frammenti su un papiro trovato a Ercolano[6] è tutto ciò che possiamo leggere delle centinaia di libri scritti da Crisippo, che le testimonianze ci indicano come il maggior pensatore dell'epoca; un'opera fondamentale come il trattato *Sul metodo* di Archimede è stata fortunosamente ritrovata nel 1906 da Heiberg in un palinsesto e grazie a rinvenimenti papirologici recenti possiamo leggere Menandro, ma si tratta di pochi casi fortunati.

La gravità della distruzione delle opere ellenistiche è stata spesso nel passato sottovalutata, in base all'ottimistica teoria che quelle sopravvissute fossero le opere migliori. Si è pensato cioè che la "civiltà classica" ci avesse tramandato alcune opere fondamentali che erano riuscite a includere le conoscenze contenute negli scritti andati perduti. Purtroppo questa visione ottimistica si è rivelata destituita di fondamento. Infatti le opere migliori non possono salvarsi grazie a un meccanismo automatico di selezione naturale in presenza di una generale regressione del livello della civiltà. Il fatto che la stessa tradizione che ci ha conservato integralmente i 37 libri della *Naturalis historia* di Plinio avesse trascurato di tramandarci le poche fondamentali pagine del trattato di Archimede *Sul metodo* è da solo una prova che questo sia proprio il nostro caso. La selezione dei posteri ha privilegiato le compilazioni o comunque le opere scritte in un linguaggio ancora comprensibile nella tarda Antichità e nel Medio Evo, quando la civiltà era regredita al livello prescientifico: abbiamo l'opera di Varrone sull'agricoltura e quella di Vitruvio

[6] Ercolano e Pompei avevano conservato rapporti privilegiati con il mondo ellenistico fino alla loro improvvisa distruzione. L'eruzione del Vesuvio ha avuto così l'effetto di preservare preziose testimonianze dell'arte e della cultura ellenistiche dalle distruzioni avvenute altrove in età imperiale e nell'Alto Medio Evo.

sull'architettura, ma non le loro fonti ellenistiche; abbiamo lo splendido poema di Lucrezio sulla natura, ma non le opere di Stratone di Lampsaco, che secondo alcuni indizi potrebbero aver costituito l'inizio della vera scienza della natura. Anche tra le vere opere scientifiche ellenistiche due sembrano i criteri di scelta seguiti dai Bizantini e dagli Arabi che ce ne hanno conservate alcune. Innanzitutto quello di privilegiare gli autori di età imperiale, le cui opere sono in genere metodologicamente inferiori ma più facilmente utilizzabili. Tra le opere dei singoli autori si sono preferite poi in genere quelle più accessibili e spesso solo le loro parti iniziali: si sono conservati i primi sei libri dell' *Aritmetica* di Diofanto ma non i successivi sette; ci è rimasto il testo greco dei primi quattro libri, più elementari, delle *Coniche* di Apollonio, ma non quello dei quattro successivi (conservati solo parzialmente in arabo); abbiamo delle traduzioni in latino e in arabo dell'opera di Filone di Bisanzio sugli esperimenti dimostrativi di pneumatica, ma non abbiamo nulla della sua opera teorica, che esponeva i principi della teoria. Vedremo in seguito altri esempi di questi criteri di selezione.

In terzo luogo, fino a poco tempo fa non erano stati effettuati scavi sistematici di centri dell'Egitto tolemaico. Gli scavi sono particolarmente difficili ad Alessandria, dove i resti della città tolemaica sono in parte sommersi e in parte sepolti sotto la città moderna. Molte delle conoscenze sull'Egitto tolemaico provengono da papiri trovati nel nostro secolo, soprattutto nella regione del Fayûm. Si tratta di ritrovamenti casuali, in genere fogli scartati usati come "carta straccia" dagli imbalsamatori.

In quarto luogo, infine, a parte alcuni eventi diplomatico-militari, tramandatici dai Romani, e qualche informazione di tipo giuridico, ricavabile ad esempio da iscrizioni, non si sa pressoché nulla sugli altri regni ellenistici. Particolarmente grave è la nostra mancanza di informazioni sul regno dei Seleucidi (che comprendeva la Mesopotamia), giacché vari indizi fanno pensare che il suo contributo allo sviluppo scientifico possa essere stato confrontabile con quello dell'Egitto tolemaico. La nostra ignoranza dipende in parte dal fatto che papiri e pergamene non possono conservarsi per millenni se non in condizioni climatiche eccezionali, come quelle che hanno preservato i fogli trovati in alcune zone dell'Egitto. Nella Mesopotamia ellenistica era ancora in uso anche la scrittura cuneiforme su tavolette di argilla, che costituiscono un materiale di scrittura ben più durevole, ma non sembra che questa fortunata circostanza sia stata molto sfruttata; Rostovzev ha scritto:

> Della Babilonia sappiamo assai di più che delle altre regioni orientali, grazie al ritrovamento di un piccolo numero di iscrizioni greche

e delle rovine di alcuni edifici di epoca ellenistica. Ma la fonte principale d'informazione è costituita da migliaia di tavolette cuneiformi dello stesso periodo, provenienti per la maggior parte da Babilonia e da Uruk. Di queste solo pochissime sono state lette e pubblicate, ancor meno tradotte...[7]

È chiaro a questo punto che il fenomeno che abbiamo chiamato "rimozione" non riguarda solo la divulgazione, ma è un fenomeno profondo della nostra cultura, che, risalendo all'epoca imperiale, colpisce ancora la storiografia attuale. Non solo non si leggono le tavolette cuneiformi, ma anche degli scritti ellenistici che ci sono rimasti spesso non è facile trovare edizioni accessibili.[8]

Cercheremo di individuare l'origine di questo fenomeno di rimozione nel corso del libro. In questa situazione, se da una parte la scarsità di documentazione rende difficile provare qualsiasi tesi, dall'altra non ci si potrebbe stupire troppo se alcune interpretazioni correnti dovessero rivelarsi fuorvianti. Il guardare alla cultura scientifica ellenistica senza sforzarsi di dimenticarla può riservare parecchie sorprese e può costringerci a modificare molte idee radicate sulla "civiltà classica".

1.2. *L'ellenismo*

Per dare un senso all'affermazione che la scienza nacque con l'ellenismo, occorre mettersi d'accordo sul significato di "ellenismo" e di "scienza". Questo paragrafo e il prossimo sono dedicati alla definizione di questi due termini.

Cominciamo con l'inquadrare nel tempo e nello spazio la civiltà che ci interessa e alcuni dei principali protagonisti della rivoluzione scientifica. L'ellenismo, secondo la terminologia introdotta da Droysen e accettata dalla storiografia successiva, si fa iniziare nel 323 a.C., con la morte di Alessandro Magno.[9] L'impero che era stato di Alessandro si dissolse alla sua morte, dando luogo a varie entità politiche, che furono governate dapprima in nome dell'im-

[7] [Rostovzev SO], pp. 601- 602.

[8] Ad esempio non esiste un'edizione critica dei frammenti di Eratostene. L'unico tentativo in questo senso, dovuto a G. Bernhardy, risale al 1822. Per quanto riguarda in particolare le opere scientifiche, non esiste alcuna raccolta di classici confrontabile con le autorevoli collane dedicate alle opere letterarie o filosofiche.

[9] Poiché la novità essenziale del periodo consiste nell'attuazione del programma di Alessandro di ellenizzazione dei territori degli antichi imperi, potrebbe sembrare più logico scegliere la data dell'inizio della spedizione (o del regno) di Alessandro. La differenza di pochi anni è naturalmente inessenziale, ma la scelta (un po' macabra) adottata è indicativa della parziale sopravvivenza anche in Droysen del pregiudizio sulla "decadenza ellenistica".

peratore da vari pretendenti a questo titolo e costituirono poi dei regni autonomi. I tre stati principali furono:

- l'Egitto, con capitale nella nuova città di Alessandria (fondata da Alessandro nel 331 a.C.), retto dalla dinastia dei Tolomei, che governavano anche Cipro, la Cirenaica, e, nel III secolo a.C., la Fenicia e la Palestina;
- lo stato dei Seleucidi, con capitale Antiochia. che comprendeva la Siria, quasi tutta l'Asia Minore, la Mesopotamia, l'Iran e dopo il 200 a.C. anche la Fenicia e la Palestina;
- lo stato degli Antigonidi, comprendente la Macedonia e alcune città della Grecia.

Vi erano poi stati minori, quali il regno di Pergamo, retto dalla dinastia degli Attalidi, il Ponto e la Bitinia. Uno stato ellenistico sul quale abbiamo poche informazioni, ma che probabilmente ebbe un ruolo importante come intermediario tra la cultura ellenistica e quelle indiana e cinese fu la Battriana, che si estendeva sugli attuali Turkestan e Afghanistan.

La civiltà ellenistica non fu prodotta solo dai Greci abitanti nelle regioni che avevano formato l'impero di Alessandro, ma ebbe anche il contributo delle città greche autonome, che erano distribuite in tutto il Mediterraneo. Tra i centri autonomi importanti vi furono Rodi, Siracusa e Marsiglia.

La scienza "esplose" nel corso del III secolo a.C. ed è stata detta spesso alessandrina perché ebbe il suo centro principale ad Alessandria d'Egitto. Uno dei motivi di questa supremazia fu certamente la politica dei primi Tolomei: particolarmente importante fu l'opera di Tolomeo I Sotèr (323-283) e di Tolomeo II Filadelfo (283-246).

Ad Alessandria, intorno alla fine del IV secolo a.C., lavorò e insegnò Euclide. Nella prima metà del III secolo a.C. vissero ad Alessandria Ctesibio, fondatore della pneumatica e iniziatore della scuola dei meccanici alessandrini, ed Erofilo di Calcedonia, fondatore dell'anatomia e della fisiologia scientifiche.[10] Alla stessa epoca risale l'attività di Aristarco di Samo, famoso soprattutto per avere elaborato la teoria eliocentrica.[11] Ad Alessandria, sotto la guida dei discepoli di Euclide, studiò molto probabilmente Archimede (287-212), che anche da Siracusa rimase in contatto epistolare con gli scienziati alessandrini. Tra gli scienziati della seconda metà del III secolo vi fu Eratostene, che fu bibliotecario di Alessandria e che, tra l'altro, effettuò la

[10] È accertato che Ctesibio fosse attivo durante il regno di Tolomeo II Filadelfo (cfr., ad esempio, [Fraser], vol. II, p. 622). Torneremo sul problema della datazione di Erofilo.

[11] Sappiamo da Tolomeo che Aristarco aveva fatto delle osservazioni nel 279 a.C. (Tolomeo, *Almagesto*, III, i, 206).

prima vera misura delle dimensioni della Terra. Crisippo, che ci interesserà in particolare per i suoi contributi alla logica, visse nello stesso secolo ad Atene, che era rimasto il principale centro di studi filosofici. L'attività ad Alessandria di Filone di Bisanzio, continuatore del lavoro di Ctesibio, risale probabilmente alla fine del secolo. A cavallo tra la fine del secolo e l'inizio del successivo lavorò Apollonio di Perga, cui dobbiamo in particolare lo sviluppo della teoria delle sezioni coniche.[12] Il massimo scienziato del II secolo a.C. fu Ipparco di Nicea, attivo a Rodi, che si occupò soprattutto di astronomia.

Dal 212 a.C. (distruzione di Siracusa e uccisione di Archimede) in poi i centri dell'ellenismo furono sconfitti e conquistati dai Romani. Nel corso del II secolo a.C. gli studi scientifici decaddero rapidamente. In particolare l'attività scientifica ad Alessandria cessò drammaticamente nel 145-144 a.C., quando vi fu una feroce persecuzione della classe dirigente greca da parte di Tolomeo VIII (Evergete II), appena salito al trono. Polibio dice che l'etnia greca della città di Alessandria ne fu quasi completamente distrutta[13]; Ateneo dà una vivace descrizione della conseguente diaspora di intellettuali dalla città[14]; altre fonti danno pochi altri particolari.[15] Le informazioni non sono sufficienti per ricostruire le cause della persecuzione. Evergete II anche successivamente continuò a svolgere una politica ostile alla comunità greca di Alessandria, appoggiandosi all'elemento indigeno.[16] Poiché egli aveva goduto dell'aiuto dei Romani già prima di ottenere il trono (quando, esiliato dal fratello, si era recato a Roma[17]), si può pensare che fosse divenuto uno strumento della politica espansionistica di Roma nel Mediterraneo,[18] che in quegli anni era particolarmente violenta.[19]

[12] Per la datazione di Apollonio cfr. G.J. Toomer, *Apollonius of Perga*, in [DSB], vol. I, pp. 179-193.

[13] Polibio, *Storie*, XXXIV, 14.

[14] Ateneo, *Deipnosophistae*, IV, 184 b-c.

[15] Ad esempio Valerio Massimo racconta che il re fece circondare il ginnasio e uccidere tutti coloro che vi si trovavano (*Factorum et dictorum memorabilium libri IX*, IX, ii, ext. 5). Le altre poche fonti sulla persecuzione sono raccolte in [Fraser], vol. II, pp. 216 sgg.

[16] Gli Alessandrini riuscirono a cacciarlo, ma egli riconquistò Alessandria nel 127 a.C.

[17] Cfr. Polibio, *Storie*, XXXI, 20.

[18] Questa impressione sembra confermata da un'iscrizione di Delo che contiene la dedica di una statua a un generale di Evergete II, da parte di commercianti romani, per riconoscenza "dei benefici loro concessi quando Alessandria fu presa dal re Tolomeo Evergete" (cioè Evergete II). La dedica non si riferisce ai fatti del 145-144, ma all'episodio del 127. L'iscrizione ([OGIS], 135) è riportata anche in [Fraser], vol. II, p. 217.

[19] Ricordiamo che nel 146 a.C. i Romani avevano raso al suolo Cartagine e Corinto.

L'espansione di Roma si concluse nel 30 a.C. con l'annessione dell'Egitto che completò l'unificazione sotto il dominio di Roma di tutto il Mediterraneo. Questo evento viene di solito considerato il termine dell'ellenismo, cui si fa seguire il "periodo imperiale". Dal nostro punto di vista non si tratta però di una data particolarmente significativa. Mentre infatti il periodo aureo della scienza si era già tragicamente chiuso da più di un secolo, con la fine dell'attività scientifica ad Alessandria e la conquista romana degli altri principali centri, la cultura ellenistica sopravvisse nell'età imperiale. Gli ex regni infatti non furono assimilati né linguisticamente né culturalmente e dal punto di vista tecnologico ed economico vi furono forse più aspetti di continuità con il periodo precedente che somiglianze con l'Occidente latino. Per questi motivi si continua a volte a usare il termine ellenismo per indicare la cultura di quella parte dell'impero romano nella quale la lingua dominante continuò ad essere il greco.

Dopo l'interruzione dovuta alle guerre con Roma, la "pax romana" permise una parziale ripresa della ricerca scientifica, in particolare ad Alessandria, tra il I e il II secolo d.C. (epoca di Erone, Tolomeo e Galeno), dopo di che il declino fu inarrestabile. Alessandria continuò comunque ad essere il principale centro scientifico ancora per secoli. L'ultimo scienziato di valore fu forse Diofanto, vissuto in epoca incerta tra il II e il IV secolo d.C. [20] L'attività scientifica documentata nel IV secolo d.C. non è originale, ma si limita a compilazioni, commenti e redazioni di vecchie opere; tra i commentatori e redattori di quest'epoca ci interesseranno in particolare Pappo, la cui *Collezione* raccoglie molti risultati matematici altrimenti ignoti, e Teone di Alessandria, cui dobbiamo le redazioni degli *Elementi* e dell' *Ottica* di Euclide trasmesse nei secoli successivi. La fine della scienza antica si pone a volte nel 415, anno in cui la figlia di Teone, Ipazia, anche lei matematica (aveva scritto commenti ad Apollonio, Tolomeo e Diofanto) fu linciata ad Alessandria da una folla di cristiani fanatici per motivi religiosi.

Poiché dello straordinario sviluppo scientifico ellenistico ci sono rimaste solo poche opere e frammenti, spesso non databili esattamente, cercheremo di descriverne le caratteristiche essenziali senza seguirne sempre lo sviluppo storico. [21] L'attenzione

[20] La decifrazione di testi cuneiformi ha però drasticamente ridimensionato l'originalità di Diofanto, mostrando che i metodi da lui descritti erano in uso da molto tempo in Mesopotamia.

[21] Tra le storie della scienza antica ricordiamo innanzitutto [Enriques de Santillana]. Quest'opera, che non è stata più ristampata, è ricca di idee e, anche se superata in questioni di dettaglio, mi sembra preferibile a molti dei libri attualmente in commercio. Un utile compendio, contenente una rassegna del

sarà rivolta soprattutto ai secoli III e II a.C., ma quando mancheranno documenti di questo periodo su aspetti importanti se ne useranno altri risalenti ai secoli successivi. Nell'uso di scritti risalenti al periodo imperiale occorre però grande cautela, giacché vedremo che la metodologia scientifica vi aveva subìto una profonda involuzione. Quando accenneremo ad alcuni aspetti politici ed economici della rivoluzione scientifica sarà ovviamente essenziale distinguere il periodo dell'indipendenza degli stati ellenistici da quello dell'ellenismo all'interno dell'impero romano.

1.3. *La scienza*

Un'organizzazione del sapere di tipo rozzamente enciclopedico rischia spesso di accreditare l'esistenza di una moltitudine di "scienze", tutte con pari dignità, ciascuna caratterizzata dal suo oggetto particolare: chimica, ornitologia, matematica, tricologia, informatica e così via. Secondo questa concezione basta delimitare un oggetto possibile di conoscenze e trovare un nome (possibilmente di origine greca) per creare una nuova "scienza", concepita come un contenitore in cui saranno riposte tutte le "affermazioni vere" riguardanti l'oggetto specifico scelto. A volte, anzi, a qualcuno è sembrato sufficiente un po' di greco nel nome, senza neppure l'oggetto: sono nate così, ad esempio, la parapsicologia e l'ufologia.[22]

Secondo questa concezione la storia della scienza è l'unione delle storie di tutte le scienze particolari, ciascuna delle quali è concepita come una cronologia delle "acquisizioni di verità" nel particolare settore considerato. Naturalmente chi condivide questa concezione mostra scarso interesse per la storia della scienza: è il caso di molti storici, che al più dedicano alla scienza qualche accenno.

Nonostante alcune elaborazioni filosofiche fossero state ben più complesse, la concezione rozza appena descritta è stata molto

contenuto delle opere rimasteci, è [Heiberg GMNA]. Un'antologia di fonti è [Cohen Drabkin]. [Sarton] può ancora essere utile come repertorio bibliografico. Per la scienza antica, come per la civiltà classica in generale, l'enciclopedia [Pauly-Wissowa] è spesso insostituibile. Ricordiamo inoltre [Van der Waerden] e [Neugebauer, ESA]; quella di Neugebauer non è una storia delle scienze esatte nell'Antichità, ma una serie di lezioni monografiche; particolarmente importante è il materiale relativo alla Mesopotamia.

[22] Poiché UFO è la sigla di Unidentified Flying Objects la parola ufologia significa più o meno "conoscenza degli oggetti volanti sconosciuti": si tratta quindi di una "scienza" il cui contenuto è vuoto per definizione. Considerazioni analoghe valgono per la parapsicologia.

diffusa tra gli scienziati almeno fino ai primi decenni di questo secolo. La continua e rapida modifica dei principi scientifici, in particolare nella fisica del Novecento, ha reso infine insostenibile la tesi che la scienza fosse un insieme di affermazioni certamente vere. Questa concezione, infatti, costringe a considerare "non scientifiche" tutte le teorie superate. Finché si era trattato di conoscenze il più delle volte vecchie di secoli, il loro declassamento era stato accettato di buon grado, ma con il nuovo ritmo dello sviluppo scientifico lo stesso criterio avrebbe costretto a escludere dal novero della "scienza" tutti i risultati non ottenuti negli ultimissimi anni. Ciò è sembrato inaccettabile agli scienziati, probabilmente perché li avrebbe costretti ad accettare come inevitabile il futuro riconoscimento di "non scientificità" anche dei risultati propri. È divenuto chiaro, in altri termini, che una buona definizione di "scienza" deve permettere di considerare scientifiche anche affermazioni tra loro contraddittorie, come i principi della meccanica classica e quelli della meccanica relativistica. D'altra parte è ovvio che l'utilità del termine scienza sta nella possibilità di distinguere le conoscenze "scientifiche" da altre conoscenze anche certamente "valide", quali le conoscenze tecnologiche prescientifiche o le attuali conoscenze storiche.

Ciò che distingue la scienza da altre forme di conoscenza non è quindi certamente la validità assoluta delle affermazioni scientifiche.

Cos'è allora la scienza?

A prima vista può sembrare che si possa rispondere a questa domanda usando due metodi sostanzialmente diversi: o descrivendo le caratteristiche della scienza così come si è storicamente determinata, cercando cioè di definirla attraverso lo studio della sua storia, oppure affrontando il problema sul piano teoretico. In realtà è evidente che i due metodi non sono indipendenti, giacché se è certamente vero che non si può affrontare seriamente il problema epistemologico della caratterizzazione del "metodo scientifico" ignorando la storia della scienza, è anche ovvio che non è possibile alcuna storia della scienza che non sia basata su una definizione, magari tacita o addirittura inconsapevole, di scienza.

Poiché questo vuole essere un saggio storico e non filosofico, ma, d'altra parte, la consapevolezza sembra preferibile al suo contrario, in questo paragrafo daremo una definizione di scienza, cercando di illustrarla, ma senza discuterne la validità. Questa definizione non ha, naturalmente, lo scopo di rispondere esaurientemente alla domanda precedente, ma quello di definire l'oggetto delle prossime pagine, nella convinzione che la storia della "scienza", nel senso in cui la definiremo, possa essere utile anche ad affrontare il problema epistemologico.

Consideriamo innanzitutto la "scienza esatta", che è costituita da teorie, quali la termodinamica, la geometria euclidea o il calcolo delle probabilità, con le seguenti caratteristiche essenziali:

1. Le affermazioni "scientifiche" non riguardano oggetti concreti, ma enti "teorici" specifici.

La geometria euclidea, ad esempio, può fare affermazioni su angoli o segmenti e la termodinamica sulla temperatura o l'entropia di un sistema, ma in natura non esistono "angoli", "segmenti", "temperature" o "entropie".

2. La teoria ha una struttura rigorosamente deduttiva; è costituita cioè da pochi enunciati fondamentali ("assiomi", "postulati" o "principi") sui propri enti caratteristici e da un metodo unitario e universalmente accettato per dedurne un numero illimitato di conseguenze.

In altre parole la teoria fornisce metodi generali per risolvere un numero indeterminato di problemi. Tali problemi, enunciabili nell'ambito della struttura della teoria, sono in realtà "esercizi": problemi, cioè, sui quali vi è un accordo generale tra gli esperti sui metodi che possono essere usati per risolverli e per controllare la correttezza della soluzione. I metodi fondamentali sono la dimostrazione e il calcolo. La "verità" delle affermazioni "scientifiche" è quindi in questo senso garantita.

3. Le applicazioni al mondo reale sono basate su delle "regole di corrispondenza" tra gli enti della teoria e gli oggetti concreti.

Le "regole di corrispondenza", a differenza delle affermazioni interne alla teoria, non hanno alcuna garanzia assoluta. Il metodo fondamentale per controllare la validità delle regole di corrispondenza, cioè l'applicabilità della teoria, è il metodo sperimentale. L'ambito di validità delle regole di corrispondenza è però in ogni caso limitato.

Ogni teoria con le tre caratteristiche precedenti sarà detta "teoria scientifica". Lo stesso termine sarà usato anche per alcune altre teorie, che potremmo chiamare "di ordine superiore". Esse si differenziano da quelle finora considerate in quanto non possiedono "regole di corrispondenza" che ne permettano l'applicazione al mondo reale, ma sono applicabili solo ad altre "teorie scientifiche". È questo il caso più frequente nella matematica contemporanea. Ciò non altera naturalmente in modo essenziale il rapporto teoria-realtà (se non forse nella coscienza di alcuni di quelli che, lavorando ai livelli superiori, possono dimenticarlo), in quanto tale rapporto, anche se indiretto, è comunque garantito dallo stesso meccanismo di formazione delle teorie.

Per "scienza esatta" intenderemo l'insieme delle "teorie scientifiche".

Un criterio semplice per controllare se una teoria è "scientifica" è quello di verificare se è possibile compilarne un manuale di esercizi; se ciò non è possibile, certamente non si tratta di una "teoria scientifica".

La grande utilità della "scienza esatta" consiste nel fornire modelli del mondo reale all'interno dei quali esiste un metodo garantito per distinguere le affermazioni false da quelle vere. Mentre la filosofia della natura aveva mancato l'obiettivo di produrre enunciati assolutamente veri sul mondo, la scienza riesce a garantire la "verità" delle proprie affermazioni, a patto però di limitarle nell'ambito di modelli. Tali modelli permettono naturalmente di descrivere e prevedere fenomeni naturali, trasferendoli a livello teorico con le regole di corrispondenza, risolvendo gli "esercizi" così ottenuti e trasferendo di nuovo le soluzioni ottenute al mondo reale. Vi è però anche un'altra possibilità, ben più interessante: quella di muoversi liberamente all'interno della teoria, arrivando in punti cui le regole di corrispondenza non associano nulla di concreto. A quel punto, avendone il modello teorico, si può spesso costruire la realtà corrispondente, modificando il mondo esistente. Le "teorie scientifiche", anche se nascono per descrivere fenomeni naturali, per la possibilità che hanno di autoestendersi con il metodo dimostrativo, divengono quindi in genere modelli di settori di attività tecnologica. La "tecnologia scientifica", caratterizzata dall'avvalersi di una progettazione effettuata all'interno delle "teorie scientifiche", appare così intrinsecamente legata alla stessa struttura metodologica della scienza esatta e non può che nascere con questa.

Uno degli scopi di questo lavoro è il tentativo di verificare l'ultima affermazione (che è in aperta opposizione al luogo comune della mancanza di applicazioni tecniche della scienza nell' "antichità") mediante un'analisi della scienza e della tecnologia ellenistiche. Si cercherà del resto di chiarire meglio tutte le caratteristiche metodologiche fin qui esposte attraverso l'esame delle prime "teorie scientifiche", che sono appunto quelle ellenistiche.

Ogni "teoria scientifica" ha un'utilità limitata, potendo in genere essere usata solo come modello di fenomeni che non siano troppo "lontani" da quelli che ne avevano motivato l'elaborazione. Le teorie che si rivelano inadeguate a descrivere una fenomenologia nuova debbono a tal fine essere sostituite; esse restano però, in base alla nostra definizione, delle "teorie scientifiche" e potranno continuare ad essere usate nel loro proprio ambito.

La struttura della scienza è arricchita dai collegamenti di vario tipo che si stabiliscono tra le diverse teorie: a volte una riesce a includerne un'altra; più spesso si hanno delle intersezioni degli ambiti di applicabilità.

Due aspetti essenziali della scienza esatta, strettamente connessi tra loro, sono da una parte l'unità metodologica e dall'altra l'estrema flessibilità nel considerare nuovi oggetti di studio. La "scientificità" dello studio di un fenomeno non dipende infatti dal tipo di fenomeno, ma dalla possibilità o meno di usare "teorie scientifiche", possibilità che è un dato storicamente determinato. Così, ad esempio, lo studio delle reazioni chimiche, che per secoli era stato puramente empirico, entra a pieno titolo nella "scienza esatta" appena si riesce ad affrontare il problema con i metodi di quest'ultima, creando la teoria atomica.

Le divisioni più significative della scienza esatta sono quelle basate non sui fenomeni studiati, ma sulle teorie, ciascuna delle quali è in genere applicabile a un insieme vastissimo di fenomeni, che, in assenza della teoria, apparirebbero privi di relazione reciproca.

Per "scienza" intenderemo innanzitutto la "scienza esatta". Le "scienze empiriche" sono accomunabili in qualche misura alla scienza esatta, distinguendosi dalle forme di conoscenza prescientifiche, innanzitutto perché il loro sviluppo è basato sul metodo sperimentale ed è opera di specialisti il cui lavoro, ben distinto sia dalla speculazione filosofica che dalle attività professionali, ha uno scopo puramente conoscitivo. Si può parlare di teorie anche nel caso delle scienze empiriche, in quanto anch'esse sono basate sulla elaborazione di specifici concetti teorici, ma queste "teorie empiriche" non soddisfano la seconda delle proprietà che abbiamo usato per definire le "teorie scientifiche", in quanto ad esse manca la struttura rigorosamente deduttiva che caratterizza la scienza esatta. Le "teorie empiriche", non potendo estendersi con il metodo dimostrativo, sono utilizzabili solo come modello di una fenomenologia specifica e non producono risultati esportabili in ambiti diversi. Per questo motivo è possibile e conveniente classificare le scienze empiriche, a differenza delle scienze esatte, in base al loro concreto oggetto di studio.

L'uso delle "teorie scientifiche" moderne come termine di riferimento privilegiato, come se si trattasse di verità assolute, ha spesso privato, in passato, la storia della scienza della corretta metodologia storica, fuorviando in particolare l'interpretazione della scienza antica. Questo punto può essere meglio chiarito con un esempio. Tra le tante citazioni possibili, il passo seguente di Max Jammer mi sembra particolarmente significativo:

Persino Archimede, il fondatore della statica, non offre che un contributo minimo allo sviluppo del concetto di forza. La sua trattazione della meccanica è di tipo puramente geometrico. [23]

La statica di Archimede è una "teoria scientifica" che permette di risolvere essenzialmente gli stessi problemi della statica moderna, che è nata traducendo la teoria di Archimede nel linguaggio newtoniano, in cui il concetto di forza aveva assunto un ruolo fondamentale. Come dimostrato dalle varie formulazioni della meccanica che non ne fanno uso, il concetto di forza non è una necessità di natura. Giudicare un limite della teoria di Archimede l'aver dato uno scarso contributo allo sviluppo del concetto di forza, come implicitamente sembra suggerire il passo di Jammer, è quindi un po' come giudicare un limite della lingua greca classica l'aver dato uno scarso contributo allo sviluppo della parola "cavallo". [24]

Se la storia della scienza è concepita come la storia di successive "acquisizioni di verità" riguardanti direttamente i fenomeni naturali, non si può non condividere la scelta, spesso fatta dagli storici, di relegare le notizie sulla scienza in noticine inessenziali; ma se le "teorie scientifiche" sono concepite come modelli teorici di settori dell'attività umana, è chiaro che il loro interesse storico diviene fondamentale. Da una parte, infatti, il loro studio può fornire preziose informazioni sui settori di attività per i quali i modelli stessi sono stati elaborati e usati; dall'altra si tratta di prodotti culturali che possono essere messi in relazione agli altri aspetti della civiltà che li ha elaborati.

Nel dibattito epistemologico recente l'ultimo punto è stato sottolineato fin troppo, nel senso che si è in genere dimenticata la specificità delle conoscenze scientifiche. Si tratta di un processo iniziato probabilmente con il famoso saggio di Thomas S. Kuhn [25] e sfociato nel completo relativismo. Il saggio di Kuhn comprende molte delle idee esposte finora, ma usa un concetto di "paradigma" molto più ampio di quello di "teoria scientifica", caratterizzata dalle tre proprietà elencate sopra. Ne segue che Kuhn fa rientrare nella categoria "scienza" forme di conoscenza, quali la matematica pitagorica, la fisica aristotelica o varie teorie medievali, che sono escluse dalla definizione data qui. La differenza consiste nel fatto che un "paradigma"

[23] [Jammer CF], p. 54.

[24] Nel caso particolare in esame va anche notato, peraltro, che la ricerca di formulazioni "puramente geometriche" della meccanica è stata una costante da Lagrange a Einstein, la cui teoria della relatività generale ha permesso di ridurre a una formulazione "puramente geometrica" la teoria delle forze gravitazionali.

[25] [Kuhn SSR].

come la fisica aristotelica, non avendo una struttura rigorosamente deduttiva, e non essendo quindi suscettibile di autoestendersi con il metodo dimostrativo, può fornire uno schema utile per inquadrare la realtà nota,[26] ma non può essere usato per progettare realtà diverse. Non vi è quindi alcun rapporto chiaro tra la tecnologia e la "scienza" nel senso vastissimo che Kuhn dà a questa parola. Anche il problema della nascita della scienza non può porsi nell'ambito della terminologia di Kuhn.

La definizione qui proposta di "scienza" sarà apparsa a molti troppo restrittiva. Non vi è dubbio che ne restano fuori alcune importanti elaborazioni concettuali spesso considerate "scientifiche". L'uso di una definizione restrittiva di scienza non vuole affatto negare l'importanza di altri metodi conoscitivi (tra i quali, peraltro, rientrano quelli usati in questo saggio) ma ha lo scopo di mettere a fuoco un particolare strumento intellettuale che, come cercheremo di mostrare, abbiamo ereditato dall'ellenismo ed è stato essenziale nella costruzione della "civiltà occidentale".

1.4. *Vi era "scienza" nella Grecia classica?*

La tesi che la "scienza", nel senso che abbiamo dato a questo termine, sia un prodotto dell'ellenismo non va intesa, ovviamente, nel senso che nessun elemento del metodo scientifico sia apparso prima del 323 a.C., data convenzionale che ai nostri fini andrebbe forse leggermente anticipata. Molte caratteristiche della scienza appaiono certamente già nel periodo immediatamente precedente, in particolare negli sviluppi della geometria e dell'astronomia greche nel corso del IV secolo. Cercheremo però di mostrare che:

1) non vi era "scienza" né negli antichi imperi, né nella Grecia del V secolo a.C., né nelle opere di Platone e di Aristotele[27];

2) l' "esplosione" del metodo scientifico si ebbe nel corso del III secolo a.C. e fu una caratteristica essenziale della civiltà ellenistica;

3) se nel processo di formazione del metodo scientifico si vuole individuare un punto di svolta, il miglior candidato sembra la formazione dell'impero di Alessandro.

[26] Le proprietà "fisiche" direttamente percepibili sono anzi descritte meglio dalla fisica aristotelica che non dalla scienza successiva. Cfr. [Bozzi].

[27] In alcuni lavori, in particolare di zoologia, Aristotele anticipa però alcune di quelle che saranno le caratteristiche delle scienze empiriche ellenistiche e per questo motivo può essere considerato una delle figure di passaggio verso la nascita della scienza.

L'affermazione che la cultura greca classica non abbia prodotto "scienza" richiede qualche precisazione.

Di solito il confronto tra le idee scientifiche moderne e quelle antiche viene istituito soprattutto tra la moderna fisica e le concezioni dei Greci, presentate il più delle volte come uno sviluppo di pensiero, che, iniziato nella scuola ionica, sembra sostanzialmente concludersi con Aristotele. L'istituire il confronto in questi termini permette di rendere omaggio al "pensiero greco", del quale tutti ci riconosciamo eredi, mantenendo allo stesso tempo un ovvio e sottinteso atteggiamento di benevola superiorità. Un fisico moderno, parlando di "atomi", è spesso consapevole di usare una terminologia introdotta da Leucippo e Democrito quasi due millenni e mezzo fa. Egli riconosce i meriti di questi antichi pensatori che, pur senza mezzi sperimentali adeguati e, soprattutto, privi dei nostri strumenti concettuali raffinati, erano tuttavia riusciti a intuire una teoria per certi versi "anticipatrice" di quella moderna; tale riconoscimento è concesso ben volentieri, giacché permette di mostrare la propria cultura umanistica, assaporando allo stesso tempo una gradevole sensazione di superiorità, basata sulla convinzione che gli antichi "atomi", essendo un puro parto dell'immaginazione filosofica, avessero in realtà ben poco in comune con l'omonimo oggetto della fisica moderna. Il debito ammesso esplicitamente dalla scienza moderna verso quella antica resta in genere più o meno in questi termini. Anche uno scienziato di vasta cultura come Heisenberg, nel tratteggiare un confronto tra il pensiero greco e la fisica moderna, dopo essersi soffermato a lungo sui presocratici (con pagine, peraltro, interessanti) salta da Aristotele alla scienza moderna, senza dedicare neppure una parola allo sviluppo della antica "scienza esatta", avvenuto essenzialmente da Euclide in poi.[28]

D'ora in avanti noi ci occuperemo invece della scienza ellenistica, con riferimenti solo occasionali ai suoi precedenti del periodo classico. Questa scelta è dovuta al fatto che tali precedenti non rientrano nel nostro tema. La teoria atomica di Leucippo e Democrito, ad esempio, ha certo un enorme interesse per la storia del pensiero, ma non sembra una "teoria scientifica" nel senso che abbiamo dato a questa espressione nel paragrafo precedente, in quanto, sulla base dei frammenti esistenti, non sappiamo né di teoremi di teoria atomica dimostrati da questi antichi atomisti, né di veri esperimenti da loro eseguiti.

Vanno però sottolineati i seguenti punti:

- Lo spiegare i fenomeni con teorie aventi per oggetto enti non osservabili, quali gli atomi della teoria di Leucippo e Demo-

[28] [Heisenberg], cap.4.

crito, è un passo di enorme importanza verso la costruzione di "teorie scientifiche".

• Molte di quelle che rimarranno delle idee guida nella scienza, sia ellenistica che moderna, nascono nel pensiero greco del periodo classico. È questo il caso del determinismo meccanicista, che si può far risalire almeno a Leucippo,[29] o della distinzione tra qualità primarie e qualità secondarie, presente in Democrito,[30] che sarà una base essenziale per la formulazione di teorie quantitative di fenomeni quali i suoni, i colori o le proprietà chimiche delle sostanze.

• Anche alcune idee più specifiche spesso considerate "scientifiche" appaiono già nel pensiero dei cosiddetti "presocratici".[31] Ad esempio la scienza deve agli antichi atomisti non solo l'idea generica e il nome di "atomo", ma diverse idee specifiche, come quella del moto caotico degli atomi[32] (idea che, sviluppata nel periodo ellenistico e ripresa in epoca moderna, fu essenziale per la nascita della teoria cinetica dei gas) o quella dell'esistenza di atomi uncinati che possono agganciarsi tra loro,[33] idea a volte ancora usata come illustrazione didattica nei manuali di chimica.

Per fare un altro esempio, consideriamo il famoso esperimento del "secchio di Newton", con il quale, secondo una vecchia credenza, Newton avrebbe creduto di dimostrare l'esistenza dello spazio assoluto. Come è ben noto, si tratta dell'osservazione che se un secchio pieno d'acqua è posto in rapida rotazione in un cerchio verticale l'acqua non ne cade. Osservazioni di questo tipo sono state certo importanti per la nascita della dinamica; non si tratta però di veri esperimenti, ma solo di osservazioni qualitative; non meraviglia, quindi, che esse precedano la

[29] Leucippo, *fr. 2* [Diels].

[30] Democrito, *fr. 125* [Diels].

[31] Tra i filosofi che la storiografia tradizionale ha incluso tra i "presocratici" ci interesserà in particolare Democrito, che in realtà è sopravvissuto a Socrate per diversi anni.

[32] Cfr., ad esempio, Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, IX, 31, dove l'idea è attribuita a Leucippo. Sarebbe interessante capire l'origine della concezione del moto caotico degli atomi. Un bel passo di Lucrezio sul moto disordinato del pulviscolo illuminato da un raggio di sole (*De rerum natura*, II, 112-141) dà un'indicazione sulla fenomenologia che può avere suggerito l'idea. Lucrezio accenna al moto disordinato e velocissimo degli atomi come alla causa ultima dei moti via via meno rapidi delle particelle di dimensioni maggiori. È interessante confrontare la lucida spiegazione riferita da Lucrezio con quella vitalistica data nel 1828, a proposito di una fenomenologia analoga, da R. Brown ([Brown 1], [Brown 2]).

[33] L'esistenza di atomi uncinati era stata affermata da Democrito, come sappiamo dal libro (perduto) di Aristotele *Su Democrito*, un cui brano è riportato da Simplicio (*In Aristot. de cael.*, [CAG], vol.VII, 294, 33); il brano è anche in [Diels] come testim. 37 s.v. Democrito.

nascita delle "teorie scientifiche". Osservazioni analoghe saranno state certo ben più antiche, ma il primo uso a fini teorici dell'esperimento del "secchio di Newton" sembra documentato in Empedocle.[34] La forza centrifuga fu usata in ambito cosmologico, tra gli altri, da Anassagora, che spiegò l'origine del nostro mondo con la separazione delle varie qualità di materia provocata dal meccanismo di centrifugazione di un immenso vortice.[35] Anche l'idea dei vortici in un contesto cosmologico resterà a lungo nella storia del pensiero: la teoria sulla formazione del sistema solare di Kant e Laplace ne sembra ancora influenzata.

In definitiva, molte idee di alcuni dei filosofi "presocratici" sembrano spesso vicine al successivo metodo scientifico ellenistico. In nessun caso sembra però documentabile in piena epoca classica l'uso di teorie assiomatico-deduttive o del metodo sperimentale.[36]

1.5. *Origini della scienza ellenistica*

Perché la scienza nasce proprio al sorgere della civiltà ellenistica, cioè con le conquiste di Alessandro Magno?

Probabilmente ha svolto un ruolo importante in questa nascita il nuovo tipo di relazioni instauratesi tra la civiltà greca e le antiche civiltà egiziana e mesopotamica. La tradizione della cultura greca, che nel periodo classico, oltre alla storiografia, il teatro, la democrazia politica e i capolavori della letteratura e dell'arte che tutti conoscono, aveva creato la filosofia naturale cui abbiamo già accennato, fu ovviamente essenziale. Ma cosa avevano da imparare i creatori di questa stupenda civiltà, ad esempio, dagli Egizi? È importante rendersi conto del fatto (a lungo ignorato) che, nonostante tutte le conquiste della cultura

[34] Cfr. Aristotele, *De caelo*, II, 13, 295a, 13 sgg. Empedocle, secondo Aristotele, aveva usato l'esperimento del secchio per argomentare qualcosa sull'immobilità della Terra.

[35] Anassagora, *fr.* 9 [Diels].

[36] In epoca imperiale alcuni esperimenti di acustica (riguardanti in particolare il variare delle frequenze proprie di una corda tesa al variare della tensione) furono attribuiti a Pitagora da Nicomaco di Gerasa (*Manuale di Armonia*, 6), da Giamblico (*Vita Pitagorica*, 115-119) e da altri autori. Si tratta però di testimonianze molto sospette, non solo per motivi cronologici e per la generale tendenza dei neopitagorici come Nicomaco (dal quale Giamblico e altri traggono il loro resoconto) a retrodatare a Pitagora ogni conoscenza, ma anche perché gli stessi esperimenti sono attribuiti non a Pitagora ma a successivi "Pitagorici" non meglio individuati sia da Porfirio che, altrove, dallo stesso Giamblico; cfr. Porfirio, *In Ptolemaei Harmonica*, (ed. Düring), 119, 13-120, 7; Giamblico, *In Nicomachi arithmeticam introductionem*, 121.

greca, i Greci dell'età classica erano ancora inferiori agli abitanti dell'Egitto e della Mesopotamia dal punto di vista tecnologico. È interessante a questo proposito rileggere alcune frasi di Charles Singer nell'epilogo del secondo volume della *Storia della tecnologia*:

> Qualunque sia il punto di vista sulla bellezza e sull'interesse dell'arte, della letteratura, dell'etica e del pensiero della Grecia e di Roma, non è più possibile sostenere che la loro tecnologia fosse superiore a quella degli antichi imperi [...].
> La curva della capacità tecnologica tende a scendere piuttosto che a salire, con l'avvento delle culture classiche. Per sincerarsene basta confrontare i capitoli specifici del primo volume con i corrispondenti capitoli del presente volume [...].
> La Grecia e Roma poggiarono la loro potenza sulla distruzione delle civiltà più antiche [...] L'ascesa del popolo ellenico e di quello romano [...] fu principalmente una vittoria di barbari su una logora ma antica civiltà.[37]

Si tratta di una delle conclusioni del lavoro più completo di storia della tecnologia finora scritto, cui hanno contribuito i massimi esperti del settore, e va quindi considerato con grande attenzione. Colpisce però quell'associare continuamente Grecia e Roma in un binomio indissolubile e meccanico. Non si capisce in che senso la Grecia avrebbe distrutto civiltà più antiche, né in quale senso si possa considerare *barbaro* il popolo ellenico. Inoltre è facilmente documentabile, come vedremo, un innalzamento del livello tecnologico in Egitto all'epoca dei Tolomei. Questa conclusione di Singer appare ottenuta sovrapponendo tre elementi di natura molto diversa:

a) La constatazione (molto interessante perché tratta da un enorme lavoro relativo alle tante tecniche particolari studiate) che la tecnologia degli antichi imperi fosse superiore a quella della Grecia classica (punto che qui ci interessa) e a quella in uso a Roma.

b) La constatazione (abbastanza ovvia) che Roma abbia poggiato la propria potenza sulla distruzione di civiltà superiori.

c) I luoghi comuni in base ai quali Grecia e Roma vengono associate acriticamente in un binomio indissolubile e per "civiltà greca" si intende solo quella dell'età classica, dimenticando l'originalità della civiltà ellenistica.

Possiamo comunque considerare certo che i Greci che si trasferirono in Egitto e in Mesopotamia all'epoca delle conquiste di Alessandro Magno vi trovarono un livello tecnologico superiore al proprio. La cosa è del resto del tutto naturale. Trattandosi, sia

[37] [HT], vol. II, pp. 766-767.

per la Grecia classica che per l'Egitto e la Mesopotamia, di civiltà prescientifiche, in cui lo sviluppo della tecnologia avveniva essenzialmente per lenta accumulazione, i millenni durante i quali le civiltà egiziana e mesopotamica avevano accumulato conoscenze empiriche trascrivendole e tramandandole le avevano rese insuperabili, a meno di un salto di qualità metodologico.

Le tradizioni delle civiltà più antiche, con le quali da secoli erano stati in contatto, avevano sempre attirato l'interesse dei Greci. Non a caso l'inizio della matematica ellenica era attribuito a Talete e a Pitagora, di entrambi i quali si diceva che fossero stati in Egitto (e di Pitagora anche in Oriente). Ma ora il contatto diviene molto più stretto.[38] I Greci trasferitisi nei nuovi regni sorti dalla conquista di Alessandro dovevano gestire e controllare economie e tecnologie più sviluppate, alle quali non erano abituati, con la guida essenziale della propria superiore razionalità. In questa situazione nacque la scienza.

In realtà può sembrare che all'epoca della formazione dell'impero di Alessandro molte caratteristiche del metodo scientifico fossero già acquisite. Poiché non ci resta nessuna opera scientifica di quel periodo è difficile affermarlo con certezza, ma i progressi realizzati da scienziati come Eudosso di Cnido qualche decennio prima delle conquiste di Alessandro sembrano avere una grande continuità con il periodo successivo. Mentre però dalle testimonianze rimasteci la continuità appare chiara per quanto riguarda singoli strumenti elaborati all'interno della matematica e dell'astronomia, l'esplosione del metodo scientifico, consistente nell'elaborazione di molte diverse "teorie scientifiche", intese come modelli del mondo reale basati su sistemi di assiomi esplicitamente individuati, sembra una caratteristica nuova del periodo ellenistico.

Notiamo che l'applicazione del metodo scientifico richiede la capacità di usare contemporaneamente due diversi livelli di discorso (uno interno alla teoria scientifica e l'altro riguardante gli oggetti concreti) e di passare da un livello all'altro con quelle che abbiamo chiamato "regole di corrispondenza"; sembra suggestiva la congettura che questa capacità sia stata favorita, nei territori appartenuti all'impero di Alessandro, dalla contemporanea presenza di due culture e dall'abilità sviluppata dai Greci immigrati di usarle entrambe contemporaneamente ai propri scopi, in particolare inquadrando nei propri schemi concettuali

[38] Va però osservato che le interazioni tra i Greci e i territori degli antichi imperi si erano intensificate nel corso del IV secolo, anche grazie a una intensa immigrazione, e che quindi l'intensificazione dei contatti di cui si parla in qualche misura (difficile da precisare) aveva preceduto l'impresa di Alessandro, contribuendo a motivarla.

il gran numero di conoscenze empiriche trasmesse nelle culture egiziana e mesopotamica.[39]

Un esempio della capacità della scienza ellenistica di fornire un quadro razionale entro il quale le conoscenze delle antiche civiltà potessero essere usate e valorizzate ci è offerto dall'organizzazione, sotto i Tolomei, dell'immane lavoro di ingegneria idraulica consistente nella regolazione delle piene del Nilo. Si trattava di un problema sul quale la civiltà egiziana aveva accumulato esperienze millenarie; anzi era stato il problema che aveva motivato la nascita stessa dell'Egitto come stato unitario.[40] I Tolomei organizzarono i lavori necessari utilizzando molti esperti egiziani, ma affidando la direzione del settore a ingegneri greci. Vedremo più avanti cosa questi ingegneri greci fossero in grado di fare.

Poiché a volte è stato sostenuto il contrario, va sottolineato che non si vuole assolutamente dire qui che caratteristiche essenziali della civiltà ellenistica siano state mutuate dalle civiltà degli antichi imperi, ma solo che il confronto con queste civiltà, da cui certamente furono tratti alcuni elementi, tra l'altro tecnologici e organizzativi, fu un importante stimolo per lo sviluppo della civiltà greca dal livello classico a quello ellenistico.

1.6. *È esistita una "fisica" ellenistica?*

È esistita una "fisica" ellenistica? La risposta dipende ovviamente dal significato che si vuol dare alla parola "fisica" e deve essere certamente affermativa se con questo si intende dire che in epoca ellenistica era stata sviluppata una scienza della natura basata su teorie assiomatico-deduttive, quantitativa e sperimentale. In altre parole gli scienziati ellenistici usavano "teorie scientifiche", nel senso che abbiamo dato a questo termine.

Per mostrare il salto di qualità rispetto alla "fisica" aristotelica ricordiamo che Aristotele aveva scritto:

[39] Notiamo incidentalmente che un analogo uso contemporaneo di due diverse culture (quella della propria gente e quella del paese in cui si vive) è stato caratteristico, nell'età moderna, del popolo ebraico, cui anche dobbiamo molti dei principali risultati scientifici.

[40] All'origine dello stato egiziano, come delle altre strutture statuali delle antiche civiltà fluviali (in Mesopotamia, nella valle dell'Indo e in quella del Fiume Giallo), vi fu l'esigenza di coordinare i lavori di irrigazione e di costruzione di argini, come osservato per primo da Karl Marx. Tale osservazione fu il punto di partenza di Karl Wittfogel nei suoi fondamentali studi sulle "civiltà idrauliche" (cfr. [Wittfogel]). L'avere i Greci, in pochi anni, superato nei lavori di idraulica la più antica di tali "civiltà idrauliche" illustra bene la potenza del nuovo metodo scientifico.

Se, poi, [la forza] A muoverà B nel tempo T secondo la lunghezza L, la metà di A, cioè E, non muoverà B nel tempo T né in una parte del tempo T secondo una parte della lunghezza L che sia rispetto all'intero L nella stessa proporzione in cui è la forza A rispetto alla forza E: [...] se fosse altrimenti, un uomo solo muoverebbe la nave, qualora venissero numericamente divise la forza di quelli che la tirano a secco e la lunghezza secondo cui tutti la muovono.[41]

Senza ricostruire tutto il ragionamento di Aristotele, ci interessano qui alcune caratteristiche essenziali del metodo con cui egli affronta il problema del moto, come del resto le altre questioni "fisiche". Il problema di Aristotele è quello di determinare la relazione quantitativa tra forza, tempo e spostamento. Con il metodo "scientifico" si possono risolvere problemi del genere solo in due modi: o assumendo una data relazione come "principio" (e allora il metodo sperimentale è essenziale per controllare che i fenomeni reali di cui si vuole costruire il modello avvengano effettivamente come si può prevedere applicando le "regole di corrispondenza" al principio enunciato) oppure deducendo la relazione cercata, con il metodo dimostrativo, all'interno di una "teoria scientifica" già esistente. Aristotele, invece, non può usare né il metodo dimostrativo né l'esperimento, giacché non ha, né vuole costruire, una "teoria scientifica". Le "forze", i "tempi" e le "lunghezze" di cui parla non sono infatti enti interni a una teoria scientifica, ma sono concepiti come oggetti concreti, dei quali è possibile comprendere le necessarie relazioni reciproche attraverso la speculazione filosofica.

Egli accenna a un dato empirico (l'impossibilità per un uomo solo di spostare una nave), ma l'argomentazione decisiva sarà che la parte considerata di forza agisce in modo diverso a seconda che sia isolata o inserita nel tutto, perché nel secondo caso la parte esiste solo in potenza. L'accenno al dato empirico è quindi in realtà essenzialmente illustrativo. Si cerca di dedurre affermazioni quantitative su particolari fenomeni fisici direttamente da principi filosofici generali, trovati grazie all'osservazione qualitativa della natura.

La confutazione dell'argomentazione aristotelica da parte di Archimede, secondo una tradizione riferita da Plutarco e da Proclo, fu molto persuasiva. Archimede avrebbe progettato, all'interno della sua "teoria scientifica" della meccanica, un congegno con il quale un uomo solo (se stesso o il sovrano Gerone II, a seconda delle versioni) sarebbe riuscito a spingere in acqua una nave tirata in secco nel porto di Siracusa (secondo Proclo si sarebbe trattato addirittura di un trealberi a pieno ca-

[41] Aristotele, *Physica*, VII, 5, 250a.

rico[42]). La macchina aveva proprio la funzione di effettuare quella divisione della forza che Aristotele aveva giudicato impossibile e che in effetti nel caso particolare della nave probabilmente non aveva precedenti. Era un modo chiarissimo di dimostrare la superiorità del metodo "scientifico", nel senso già spiegato, sulla filosofia naturale. Anziché riflettere il mondo nella speculazione filosofica, il metodo scientifico aveva permesso di cambiarlo, progettando una macchina che annullava l'impossibilità osservata da Aristotele.

Il valore metodologico dell'esperimento dimostrativo raccontato da Proclo e da Plutarco, emerso più chiaramente dal confronto con il passo di Aristotele, è naturalmente indipendente sia dall'eventuale volontà di Archimede di fare esplicito riferimento ad Aristotele[43] che dalla realtà storica dei dettagli riferiti. Ciò che è essenziale è che, poiché sappiamo che Archimede aveva realmente sviluppato la possibilità di progettare macchine con vantaggio meccanico elevato, non si tratta certamente di una leggenda nata dal nulla. Il racconto, in quanto ci tramanda da una parte il tipo di realizzazioni che la meccanica elaborata da Archimede rendeva possibili e dall'altra il diffuso interesse per questa nuova tecnologia, è certamente attendibile.[44] In genere l'episodio della nave viene invece ricordato all'interno della descrizione leggendario-aneddotica del personaggio di Archimede, privandolo completamente del suo significato.

Si legge in genere che gli scienziati greci avevano sviluppato la statica ma non la dinamica. Essi conoscevano cioè le condizioni di equilibrio, ma non le leggi del moto dei corpi. Queste affermazioni lasciano l'impressione che gli antichi scienziati, grazie alla loro natura "contemplativa", si dilettassero a osservare corpi in equilibrio, guardandosi bene dallo smuoverli. L'episodio di Archimede che progetta e usa una macchina con cui da solo può trainare una nave mal si concilia con questa impressione. In realtà nel III secolo a.C. non si era sviluppata la "nostra" dinamica, ma la teoria quantitativa, che certamente si era sviluppata, di macchine come argani e ingranaggi demolti-

[42] *Procli Diadochi in primum Euclidis elementorum librum commentarii* (ed. G. Friedlein), 63. Lo stesso episodio è narrato da Plutarco in forma leggermente diversa (Plutarco, *Vita di Marcello*, xiv, 8).

[43] Il volontario riferimento al passo aristotelico è stato sostenuto da C. Mugler ([Mugler: Archimède], tome I, *Introduction*, p. xi).

[44] Anche l'effettiva realizzazione dell'esperimento dimostrativo in termini simili a quelli raccontati non sembra impossibile. Un uomo solo non avrebbe potuto certo trainare la "nave" per distanze apprezzabili. Se però la dimostrazione fosse stata preparata trainando lentamente a riva l'imbarcazione finché non avesse appena iniziato a incagliarsi, non sarebbe stato impossibile per un uomo munito di una macchina adeguata liberarla.

plicatori deve essere considerata una forma di "dinamica", giacché ciò che interessa non è certo il solo equilibrio di queste macchine. L'idea che Archimede abbia creato la statica ma non la dinamica nasce dal fatto che mentre la nostra statica coincide essenzialmente con quella archimedea, non si può dire lo stesso per la dinamica. La "meccanica" di Archimede (cioè, letteralmente, la sua "scienza delle macchine") era però una "teoria scientifica" che si occupava sia dell'equilibrio che del moto, anche se, come tutte le teorie scientifiche, era applicabile solo a un ambito limitato di fenomeni.

La situazione era probabilmente analoga a quella della nostra termodinamica delle trasformazioni reversibili. Poiché sappiamo definire lo "stato termodinamico" di un sistema solo quando è in equilibrio, sappiamo studiare trasformazioni termodinamiche solo approssimandole con successioni di stati di equilibrio. Si studiano in questo modo anche cicli termodinamici che sono un modello di ciò che accade in un motore a scoppio; il modello, entro certi limiti, è applicabile, ma ciò non significa che i nostri motori a scoppio restino fermi in equilibrio; né nessuno ha mai pensato di chiamare "termostatica" lo studio di queste "evoluzioni attraverso stati di equilibrio". Analogamente il principale problema meccanico del III secolo a.C. era lo studio di macchine che, pur compiendo un lavoro, potevano essere studiate supponendo che le forze agenti fossero in ogni istante "quasi in equilibrio". È questo il caso di una gru che sollevi lentamente un peso. I problemi riguardanti sistemi meccanici di questo tipo (in particolare il calcolo del loro "vantaggio meccanico"[45]) possono essere risolti usando la meccanica di Archimede. La nostra "meccanica classica" è superiore a quella archimedea poiché, oltre a includerla, può essere applicata anche in molti casi nei quali l'ipotesi precedente non è verificata. Tale differenza è però esattamente della stessa natura di quella che la rende inferiore, ad esempio, alla meccanica relativistica. Il salto qualitativo essenziale, dalla filosofia naturale alla scienza, in Archimede è già compiuto. Si tratterà poi "solo" di sviluppare teorie capaci di fornire il modello di classi sempre più generali di fenomeni, ma la strada è tracciata, come è dimostrato dal fatto che varie teorie scientifiche ellenistiche, quali la teoria delle macchine semplici, l'idrostatica o l'ottica geometrica, sono state incluse sostanzialmente immutate nella fisica moderna. Quanto agli sviluppi successivi della meccanica ellenistica e ai suoi rapporti con la dinamica newtoniana, vi ritorneremo nei capitoli nono e decimo, scoprendo diverse cose interessanti.

[45] Torneremo su questo punto nel §3.4.

Va detto che non molti sono d'accordo con le considerazioni appena fatte. Ad esempio Sambursky cerca di dimostrare che i Greci non avevano sviluppato una fisica e lo fa citando soprattutto Platone, Aristotele e vari filosofi presocratici, mentre accenna appena agli scienziati ellenistici, dei quali non coglie assolutamente la novità.[46]

Vi è comunque un senso in cui è vero che non vi fu una "fisica" in epoca ellenistica: certamente non nacque allora una "fisica" come scienza unitaria e autonoma dalla matematica. Una delle caratteristiche della scienza antica è, infatti, l'unità di tutta la scienza esatta, che, mentre si era resa autonoma dalla filosofia naturale e dalle attività professionali, non aveva creato al suo interno la divisione tra matematica e fisica. La scienza esatta ellenistica era strutturata essenzialmente come un insieme di teorie scientifiche, delle quali una, la matematica euclidea, aveva un ruolo privilegiato, per motivi che saranno più chiari in seguito. Le altre teorie scientifiche, quali l'ottica geometrica o la teoria delle macchine semplici, che oggi abbiamo incluso nella "fisica", erano modellate sulla prima, della quale ripetevano la struttura assiomatico-deduttiva, erano applicabili in direzioni molto diverse ed erano sviluppate dagli stessi matematici impegnati nella teoria principale. Euclide, ad esempio, scrisse un trattato di ottica e Tolomeo, che è spesso considerato il massimo astronomo dell'antichità, si interessò anche di geografia matematica, di teoria musicale e di matematica pura. Anche in Archimede non vi è alcuna differenza metodologica tra le opere che in base alle etichette odierne dovremmo classificare nella matematica pura e quelle in cui si fondano la meccanica scientifica o l'idrostatica.

Va detto che la linea di divisione tra "fisica" e "matematica" non è stata neppure nella scienza moderna così ovvia e stabile come forse appare a molti ed è probabilmente in rapido movimento proprio in questi anni. Torneremo su questa questione. Per ora notiamo che le seguenti affermazioni sono tutte in genere accettate da coloro che sostengono l'inferiorità metodologica della scienza antica:

a) Uno dei principali limiti della scienza antica consiste nel fatto che, mentre era stata sviluppata la matematica, non era nata ancora la fisica.

b) Teorie ellenistiche quali l'idrostatica o l'ottica geometrica, pur essendo oggi incluse nei manuali di fisica, per la loro natura assiomatico-deduttiva non sono che matematica pura e non possono quindi testimoniare l'esistenza di una "fisica".

[46] Cfr. [Sambursky]; nel cap.10, si sostiene, in particolare, che ai Greci mancasse del tutto la capacità di sperimentare.

c) Newton è uno dei massimi fondatori della fisica moderna, grazie alla dinamica da lui formulata.

d) Lagrange, Hamilton e altri hanno dato un importante contributo allo sviluppo della scienza fondando la "meccanica razionale" (che oggi viene insegnata come parte della matematica), riuscendo cioè a dare alla dinamica newtoniana la stessa struttura assiomatico-deduttiva delle teorie scientifiche ellenistiche.

Una questione strettamente connessa a quella dell'esistenza di una "fisica" ellenistica è naturalmente l'uso del "metodo sperimentale", in genere negato anch'esso nell'Antichità. Alcuni studiosi della scienza antica mostrano per la verità di non condividere l'idea che il metodo sperimentale sia una novità della scienza moderna. Neugebauer afferma:

> Ma se gli studiosi moderni avessero dedicato a Galeno o a Tolomeo altrettanta attenzione che a Platone e ai suoi seguaci, sarebbero giunti a risultati alquanto diversi e non avrebbero inventato il mito della spiccata attitudine del cosiddetto spirito greco a sviluppare teorie scientifiche senza far ricorso a esperimenti o a verifiche empiriche. [47]

Questa opinione di Neugebauer sembra tuttavia essere rimasta nettamente minoritaria. L'idea della nascita del metodo sperimentale "galileiano" [48] nella scienza moderna sembra infatti ancora pressoché universalmente condivisa. Alla base di questa diffusa convinzione vi sono probabilmente diversi elementi:

- La confusione in cui spesso si cade tra la scienza ellenistica e la filosofia naturale del periodo classico.
- Il fatto che le opere scientifiche rimasteci privilegino le esposizioni di teorie assiomatizzate rispetto a resoconti degli esperimenti da cui erano state indotte. È difficile dubitare, ad esempio, che l'idrostatica avesse una base sperimentale, ma nel trattato di Archimede *Sui galleggianti* essa viene esposta solo come una teoria assiomatico-deduttiva. La relativa scarsità di fonti sulla scienza sperimentale può forse dipendere anche da differenze di gusto tra gli scienziati antichi e quelli moderni, ma certamente, come vedremo in più casi, deriva anche dalla selezione delle opere effettuata nei secoli successivi.
- Le differenze tra il "metodo sperimentale" ellenistico e quello moderno, con il quale viene generalmente identificato il "metodo sperimentale" *tout court*.

[47] [Neugebauer, ESA], pp.183-184. I prossimi capitoli suggeriranno che se, nonostante lo stato delle fonti, riuscissimo a dedicare a Erofilo e a Ipparco altrettanta attenzione che a Galeno e a Tolomeo potremmo giungere a conclusioni ancora più drastiche.

[48] Sulla questione dei rapporti tra il metodo sperimentale di Galileo e la scienza ellenistica torneremo nel §10.4.

Osserviamo però che se si ammette, come sempre si fa, che il metodo sperimentale caratterizza la fisica moderna, della quale Newton è stato uno dei fondatori, non si può poi senza contraddizione escludere dall'ambito delle scienze sperimentali quell'astronomia osservativa che, dopo essere stata sviluppata per secoli dagli scienziati ellenistici, ha costituito l'unica base sperimentale della dinamica newtoniana.

L'uso sistematico della sperimentazione anche in campi diversi dall'astronomia risulta comunque evidente, come vedremo nei prossimi capitoli, non solo dall'esame delle opere di Archimede, Filone di Bisanzio ed Erone, dagli scritti di Tolomeo sull'ottica o dalle testimonianze rimasteci sul lavoro di Ctesibio, ma anche dal contemporaneo nascere della sperimentazione sistematica sia nella scuola medica alessandrina (in anatomia, fisiologia[49] e terapeutica) che in tutte le altre scienze empiriche, dalla zoologia[50] e dalla botanica (il cui aspetto sperimentale è strettamente connesso all'agricoltura) alla chimica empirica, che, come vedremo, nasce nello stesso periodo.

[49] Come vedremo, la fisiologia scientifica fu basata anche su esperimenti *in vivo* sull'uomo. Anche questi terribili esperimenti mal si conciliano con la concezione diffusa di una scienza ellenistica speculativa e indifferente alla verifica sperimentale.

[50] Nei §§ 5.6 e 6.2 accenneremo in particolare agli esperimenti di selezione e ibridazione effettuati per migliorare le razze animali.

2. La matematica ellenistica

2.1. *Precedenti della scienza matematica*

Il termine "matematica" viene spesso usato in un senso molto generico: Boyer nella sua *Storia della matematica* la introduce come l'insieme di tutte le elaborazioni intellettuali che hanno avuto origine dai concetti di numero, grandezza e forma.[1] Se la si intende in questo modo, allora certamente non solo la matematica risale al paleolitico (e si può anche indagare, come è stato fatto, sulle "capacità matematiche" di vari animali), ma bisogna anche includervi, ad esempio, la smorfia napoletana,[2] che, come non si può certo negare, si occupa anch'essa di elaborazioni basate sul concetto di numero.

La scienza matematica, nel senso in cui abbiamo precisato il termine scienza, nasce invece nel periodo ellenistico. Naturalmente la matematica ellenistica non nasce dal nulla. Nella storia della "matematica" precedente si possono distinguere in prima approssimazione due fasi: la prima, lunghissima, comprende tra l'altro la "matematica" paleobabilonese e quella sviluppata nell'Egitto faraonico; la seconda consiste in un periodo di circa tre secoli nei quali la Grecia classica elabora quella che, per distinguerla dalla matematica ellenistica, viene detta matematica ellenica.

Il primo periodo iniziò con lo sviluppo della capacità di contare, risalente al paleolitico,[3] e aveva portato a un notevole ac-

[1] [Boyer], p.1.

[2] Si tratta di una serie di regole per estrarre dai sogni informazioni considerate utili per prevedere i numeri che saranno estratti nel gioco del lotto.

[3] Nell'odierno Libano si sono trovate ossa di animali, datate tra il 15.000 a.C. e il 12.000 a.C., con serie di intaccature riunite in gruppi di eguale cardinalità. La rappresentazione di conteggi ha quindi preceduto di molto l'inven-

cumularsi di conoscenze, in particolare nella cultura egiziana dell'età faraonica, nella quale, tra l'altro, per la prima volta appaiono scritti specialistici di argomento "matematico".[4] Si tratta però di scritti che possono essere detti di argomento matematico solo in quanto hanno per oggetto la soluzione di problemi che noi diremmo aritmetici o geometrici, ma nei quali è completamente assente quella struttura razionale che oggi associamo alla matematica. Questi scritti contengono prescrizioni da seguire in determinate circostanze, ma non vi è mai nulla in essi che assomigli a una giustificazione delle regole prescritte. Le prescrizioni includevano, ad esempio, il procedimento da seguire per calcolare il volume di un tronco di piramide o l'area di un cerchio (la seconda, naturalmente, in modo inconsapevolmente approssimato). Si era cioè a uno stadio in cui da una parte si erano sviluppati, accanto al concetto di numero intero, concetti abbastanza elaborati, come quelli di una molteplicità di figure piane e solide e anche di area e di volume, e si tramandavano metodi di soluzione di problemi, ma dall'altra la correttezza delle soluzioni aveva come unico fondamento l'esperienza e la tradizione. Questa, che potremmo chiamare "prematematica", era molto lontana dalla "scienza", nel senso che abbiamo dato a questa parola; era invece una parte, metodologicamente omogenea al resto e trasmessa allo stesso modo, di quell'enorme patrimonio di conoscenze empiriche che permetteva agli Egiziani le loro famose realizzazioni tecnologiche.[5] Neugebauer osserva:

> Gli autori moderni hanno spesso celebrato le meraviglie dell'architettura egiziana, senza però citare mai un concreto problema di statica risolvibile mediante i procedimenti aritmetici egizi che ci sono noti.[6]

Non bisogna stupirsi di questa assenza di applicazioni della matematica alla statica o ad altre teorie di interesse tecnologico. Poiché sia le conoscenze "matematiche" che quelle tecnologiche erano di tipo empirico, entrambe potevano essere applicate solo direttamente a problemi concreti specifici, ma, non esistendo alcuna "teoria scientifica" all'interno della quale si potessero

zione della scrittura, che del resto sembra essere nata proprio dall'evoluzione di un sistema di memorizzazione di contabilità; per una breve esposizione di tale evoluzione cfr. [Schmandt-Besserat].

[4] Per una rassegna delle fonti si può vedere [Gillings].

[5] Una fonte utile per inquadrare il ruolo delle conoscenze "matematiche" nell'ambito delle competenze richieste a uno scriba è il papiro Anastasi I. Una traduzione italiana è (a pp. 341-355) in [Bresciani].

[6] [Neugebauer ESA], p.183.

progettare realizzazioni tecnologiche, non poteva esistere ciò che abbiamo chiamato "tecnologia scientifica". Le quantità considerate nei problemi "matematici" a noi noti dell'epoca faraonica non svolgono un ruolo all'interno di una teoria, ma hanno un interesse immediato: si tratta, ad esempio, del numero di mattoni necessario per una costruzione di forma e dimensioni assegnate oppure dell'area di un campo.

Considerazioni analoghe a quelle appena fatte valgono per la "matematica" paleobabilonese, che pure era giunta a un livello superiore di elaborazione.

Il ponte tra la "prematematica" dell'Egitto faraonico e dell'antica Mesopotamia e la raffinata scienza matematica ellenistica, che sarebbe altrimenti impensabile, è rappresentato dalla "matematica ellenica". Si tratta di circa tre secoli durante i quali la cultura greca assimila i risultati egiziani e mesopotamici e li sottopone a una acuta critica razionale, in stretta relazione con l'indagine filosofica. La tradizione greca faceva risalire queste ricerche a Talete, che all'inizio del VI secolo a.C. avrebbe iniziato a far progredire la geometria che aveva imparato in Egitto, e a Pitagora, il quale nella seconda metà del secolo fondò la sua famosa associazione politico-religiosa.

Un'antica tradizione, testimoniata tra l'altro dal nome "teorema di Pitagora" col quale viene ancora indicato un famoso teorema di geometria, fa risalire il metodo dimostrativo allo stesso inizio della matematica ellenica. Questa tradizione risale almeno alla *Storia della geometria* scritta dal discepolo di Aristotele Eudemo di Rodi. Secondo Eudemo, Talete avrebbe dimostrato che un diametro divide un cerchio in due parti eguali e che angoli opposti al vertice sono eguali.[7] Non è possibile che affermazioni così apparentemente ovvie siano state i primi oggetti di dimostrazione. L'utilità del metodo dimostrativo deve prima essere stata notata dimostrando affermazioni non evidenti. Solo quando si approda a un sistema deduttivo sviluppato può sorgere l'esigenza di dimostrare anche affermazioni apparentemente ovvie come quelle attribuite a Talete.[8]

Il procedimento seguito da Eudemo, che lo portava a retrodatare sistematicamente i risultati matematici, è spiegato esplicitamente da Proclo in almeno un caso:

> Eudemo nella *Storia della geometria* fa risalire a Talete questo teorema [che triangoli aventi eguali un lato e i due angoli adiacenti

[7] Queste affermazioni di Eudemo (la cui opera non ci è rimasta) sono riferite da Proclo, *In primum Euclidis Elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 157, 10; 299, 1.

[8] Questo argomento è sviluppato in [Neugebauer, ESA], p.179.

sono eguali], perché il metodo con il quale si dice che egli determinasse la distanza delle navi in mare esige, a suo parere, l'uso di tale teorema.[9]

È evidente da questo passo come Eudemo confondesse l'ordine logico, che richiede la priorità del teorema rispetto alla sua applicazione, con l'ordine storico. In realtà per l'applicazione da lui riferita non occorre affatto conoscere il "teorema" citato; basta essere convinti (almeno nel caso particolare in esame) della verità dell'affermazione che costituisce la "tesi" del teorema, ma non occorre conoscerne una dimostrazione (senza la quale non si può evidentemente parlare di "teorema"). L'errore di Eudemo continua ad essere ripetuto. Si legge spesso l'affermazione che il "teorema di Pitagora" era noto in Mesopotamia nel periodo paleobabilonese; in realtà si conosceva, su base empirica, l'equivalenza tra il quadrato costruito sull'ipotenusa e la somma dei quadrati costruiti sui cateti, ma le idee di dimostrazione e di teorema non erano ancora state elaborate né nel periodo paleobabilonese né al tempo di Pitagora.

Senza entrare nella storia della matematica ellenica[10] mostriamo con tre esempi in che senso essa non fosse ancora vera matematica, cioè non fosse scienza, non solo all'epoca di Talete e di Pitagora, ma neppure molto più tardi.

Un esempio notevole dello stato della matematica ellenica sono i paradossi di Zenone, così famosi (soprattutto quello di Achille e la tartaruga) che non è necessario riesporli qui.[11] Perché oggi sono considerati soprattutto un argomento di filosofia, pur riguardando il concetto di quantità continua, che è certamente essenziale in matematica? Innanzitutto perché Zenone si occupa di spazio e di tempo e non del loro modello matematico, che non era stato ancora costruito. Gli strumenti usati per analizzare le nozioni di spazio e di tempo sono poi il linguaggio ordinario e la filosofia. Manca cioè ancora l'idea di "teoria

[9] Proclo, *In primum Euclidis Elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 352, 14 sgg.

[10] Sulla matematica ellenica, nonostante l'assenza quasi totale di fonti, vi è una letteratura anche più ampia che sulla matematica ellenistica. Ricordiamo solo [Lasserre] e [Szabó]. Per la matematica greca, sia nel periodo ellenico che in quello ellenistico, il riferimento standard è [Heath HGM]. Può ancora essere utile [Loria]. Una antologia di testi originali è [GMW] (ristampata nel 1980 con una utile bibliografia aggiornata al 1979); si tratta purtroppo dei soli due volumetti che la Loeb Classical Library ha ritenuto di dedicare alla matematica greca.

[11] La principale fonte sui paradossi di Zenone è Aristotele, *Physica*, VI, 9, 239b-240a. Sia il brano di Aristotele che tutte le altre fonti sono riportati in [Diels], s.v. *Zenone*. I paradossi sono discussi in [Heath HGM], vol. 1, pp. 271-283.

scientifica", nel senso specificato nel §1.3. I paradossi di Zenone ebbero certo grande importanza nel determinare l'evoluzione del concetto di "grandezza continua", che approdò infine alla teoria raffinata esposta nel V libro degli *Elementi* di Euclide, ma una volta che l'edificio era stato costruito quel tipo di ragionamenti ne restava fuori.

Un altro esempio importante è quello, risalente alla scuola pitagorica, della scoperta dell'incommensurabilità tra lato e diagonale del quadrato, che viene di solito citata come la "dimostrazione" dell'irrazionalità della radice di 2. In realtà non si deve confondere l'argomento pitagorico, che non era affatto una dimostrazione, con i suoi sviluppi successivi. Una possibile ricostruzione dell'argomento originale è la seguente. [12] I primi Pitagorici pensavano che ogni segmento fosse costituito da un numero finito di punti. [13] Se costruiamo un quadrato il cui lato è formato da un numero dispari, k, di punti, quanti punti ha la diagonale? detto n il numero di questi punti, l'ignoto pitagorico doveva avere scoperto che n doveva essere pari (poiché il quadrato di n, per il teorema di Pitagora, è $2k^2$ ed è quindi pari e solo i numeri pari hanno un quadrato pari) e allo stesso tempo dispari (poiché se fosse pari il suo quadrato dovrebbe essere multiplo di 4, mentre $2k^2$ non lo è). Poiché i pari non possono essere dispari, non si sapeva cosa concludere.

Si era ottenuta una aporia, del tutto analoga (dal punto di vista della cultura dell'epoca) a quelle di Zenone.

Il ragionamento esposto può sembrare troppo raffinato per una "matematica" ancora prescientifica, quale stiamo sostenendo fosse quella pitagorica, ma bisogna tener presente che i Pitagorici non avevano cercato di dimostrare qualcosa "per assurdo"; avevano semplicemente ottenuto (loro malgrado!) un assurdo, tentando di determinare la parità della diagonale (per i Pitagorici la proprietà di un numero di essere

[12] Le ricostruzioni si basano soprattutto su un passo di Aristotele (*Analytica priora*, I, 23, 41a, 26-27) in cui si dice che la diagonale non è commensurabile [con il lato] perché se lo fosse i numeri dispari dovrebbero coincidere con i pari. Una ingegnosa ricostruzione congetturale della scoperta dell'incommensurabilità è in [von Fritz].

[13] Come può ragionevolmente dedursi dal fatto, riportato da molte fonti, che i Pitagorici fondassero la geometria sui numeri interi, dalla teoria pitagorica dei "numeri figurati" (per la quale cfr., ad esempio, [Heath HGM], vol.1, pp. 76-84) e, soprattutto, dall'affermazione di Aristotele che i Pitagorici attribuissero una grandezza alle unità costitutive dei corpi (Aristotele, *Metaphysica*, XIII, 6; 1080b, 16-21; 1083b, 8-18). Sesto Empirico sembra usare ancora la concezione pitagorica quando sostiene l'impossibilità di bisecare un segmento formato da un numero dispari di punti (*Adversus Mathematicos*, III, 110-111; *Adversus Dogmaticos*, I, 283).

pari o dispari era molto importante ed era connessa a varie idee non matematiche). Notiamo che per usare l'argomento precedente non è necessario conoscere il teorema di Pitagora nella sua generalità, ma basta conoscerlo nel caso di un triangolo rettangolo isoscele, caso in cui per rendersi conto della sua validità basta contare i "mezzi quadrati" in una pavimentazione quadrata.

A differenza dei paradossi di Zenone, l'argomento pitagorico è incorporabile nella successiva scienza matematica, nel cui ambito fornisce la base della dimostrazione di un teorema. Per ottenere un teorema non basta però l'argomento pitagorico prima esposto, ma occorre inserirlo in una "teoria scientifica" delle grandezze continue, teoria che né Zenone né i Pitagorici possedevano e che troviamo documentata per la prima volta in Euclide. Il punto essenziale è che i pitagorici non solo non avevano una teoria delle grandezze continue, ma non possedevano il concetto di "teoria scientifica". Essi pensavano che le affermazioni sulla parità dei punti della diagonale fossero affermazioni sul mondo reale, come è indicato anche dal fatto che il raggiungimento dell'aporia fu considerato drammatico. [14] Se si scopre che una teoria scientifica è contraddittoria non vi è nulla di terribile: si cambia teoria. Ma cosa si può fare se si crede di scoprire che la realtà è contraddittoria?

Il terzo esempio sulla "matematica ellenica" è fornito da Platone. Platone è stato considerato da alcuni anche un matematico. Certamente era molto interessato alla matematica, giacché nei suoi scritti vi sono interessanti riflessioni sul metodo dimostrativo, che ai suoi tempi si iniziava a usare in geometria. [15] Nel *Timeo*, però, egli cerca di spiegare la crescita del corpo giovane scrivendo:

> Ora, quando la costituzione dell'intero animale è recente ed ha i triangoli degli elementi ancora nuovi [...], poiché i triangoli venuti dall'esterno, dai quali son costituiti i cibi e le bevande, sono più vecchi e più deboli dei suoi triangoli, li vince, dividendoli con i suoi triangoli nuovi, ed accresce l'animale nutrendolo di molti elementi simili. [16]

[14] La matematica pitagorica può sembrare descritta qui in modo troppo primitivo a chi conosce la complessa costruzione dei due medi proporzionali tra due segmenti effettuata dal pitagorico Archita. Occorre ricordare però che Archita, a parte la sua etichetta di "pitagorico", è un contemporaneo di Platone; egli è vissuto quindi quasi due secoli dopo Pitagora e pochi decenni prima di Euclide.

[15] Cfr., ad esempio, Platone, *Menone*, 82b-85e; *Repubblica*, VI, 509c-511a.

[16] Platone, *Timeo*, 81b-c.

Cosa intende veramente qui Platone con la parola "triangoli"? Qualcosa di reale, evidentemente, o suscettibile di fondare il reale, non un "oggetto matematico" (cioè un ente interno a una "teoria scientifica") come a noi, dopo ventitré secoli di geometria euclidea, sembra ovvio debbano essere. Il problema del rapporto tra gli oggetti matematici e il mondo reale deve avere almeno contribuito a suggerire a Platone la sua teoria delle idee, teoria che a sua volta ha contribuito alla nascita del concetto di "oggetto matematico", ma quale fosse questo rapporto era ancora poco chiaro: era un problema aperto, oggetto di discussione filosofica.

Accanto a queste discussioni sui rapporti tra concetti matematici e oggetti reali e alle raffinate analisi dei rapporti tra continuo e discreto, anche argomenti più tecnici furono analizzati razionalmente e queste analisi approdarono infine al metodo di dimostrazione deduttiva al quale siamo abituati. Non vi sono né documenti diretti, né indizi sufficienti per far risalire il metodo dimostrativo a epoche precedenti il IV secolo a.C. [17]

Il periodo ellenico può essere considerato, almeno in massima parte, una lunga gestazione della scienza matematica, in cui da una parte si venivano accumulando strumenti logici sempre più raffinati e dall'altra la matematica non aveva ancora raggiunto lo status di scienza. Un personaggio chiave nel passaggio dal periodo ellenico a quello ellenistico fu probabilmente Eudosso di Cnido, che nella divisione cronologica tradizionale andrebbe posto alla fine del periodo ellenico, ma poiché non ci è rimasta nessuna delle sue opere è difficile capire se egli sia stato un precursore o il fondatore della scienza matematica, quale ci appare negli *Elementi* di Euclide. Torneremo sul problema del rapporto tra Euclide e i suoi immediati predecessori del IV secolo nel § 2.6.

Nei prossimi paragrafi, senza neppure abbozzare una storia della matematica ellenistica, si cercherà di illustrarne alcuni aspetti fondamentali usando degli esempi, tratti soprattutto da Euclide [18] e da Archimede. [19]

[17] Neugebauer fa risalire il metodo dimostrativo al IV secolo a.C. (cfr. [Neugebauer, ESA], p.179).

[18] La principale edizione critica delle sue opere è [Euclidis OO]. E.S. Stamatis ha curato una edizione critica degli *Elementi* basata su quella di Heiberg ma aggiornata anche alla luce dei successivi ritrovamenti papiracei ([Stamatis *Elementi*]). [Heath *Elementi*] contiene una traduzione inglese degli *Elementi* e un ricco apparato storico-critico.

[19] Un'edizione delle opere superstiti è [Mugler: Archimède]. Un'opera molto utile su Archimede, che contiene una dettagliata esposizione del contenuto delle opere rimasteci, è [Dijksterhuis: Archimede].

2.2. *Il metodo assiomatico-deduttivo*

Nella matematica ellenica erano sorti tre tipi di problemi. Innanzitutto si era visto come certe affermazioni apparentemente ovvie su figure geometriche ne potessero implicare logicamente altre molto meno evidenti. Era quindi divenuta chiara l'utilità del metodo dimostrativo, ma evidentemente non si poteva dimostrare tutto senza rinviare all'infinito la dimostrazione di ogni affermazione. Questa considerazione è già in Aristotele.[20] D'altra parte le aporie come quelle di Zenone e dei Pitagorici avevano mostrato come fossero delicati i concetti di spazio, tempo e infinito e le relazioni tra quantità discrete e quantità continue e anche come fosse inadeguato il linguaggio ordinario per trattare tali questioni. Infine si era discusso il rapporto, non chiaro, tra i concetti propri della matematica e il mondo reale.

La soluzione di questi problemi, che possiamo vedere per la prima volta negli *Elementi* di Euclide, fu ottenuta creando la matematica come "teoria scientifica", definendo cioè esplicitamente gli enti della teoria (come cerchi, angoli retti, rette parallele, ecc.) in termini di pochi enti fondamentali (quali punti, rette, piani)[21] ed elencando le affermazioni su tali enti che debbono essere accettate senza dimostrazione.

Nel I libro degli *Elementi* vi sono 5 affermazioni di questo tipo (cioè "postulati")[22]:

1. [È possibile] tracciare un segmento da ogni punto a ogni punto.
2. [È possibile] prolungare con continuità un segmento in una retta.
3. [È possibile] tracciare una circonferenza con qualsiasi centro e raggio.
4. Tutti gli angoli retti sono eguali tra loro.
5. Se una retta intersecandone altre due forma nello stesso semipiano angoli interni la cui somma è minore di due retti, allora le due rette si incontrano in quel semipiano.

Ogni altra affermazione riguardante gli enti geometrici può e deve essere accettata come vera solo se si riesce a "dimostrarla", cioè se si trova una catena di implicazioni logiche che partendo dai postulati (e dalle "nozioni comuni") arriva

[20] Aristotele, *Analytica posteriora*, I, 2, 71b, 26-28.

[21] Veramente negli *Elementi* anche tali enti fondamentali sono "definiti" e la presenza di queste "definizioni" (che sono in realtà tautologie o frasi puramente illustrative) può apparire in contraddizione con la tesi qui esposta. A questa importante questione sarà dedicato il §9.1, dove potrà essere discussa alla luce di considerazioni contenute nei prossimi capitoli.

[22] Vi sono anche 5 "nozioni comuni", cioè affermazioni che non riguardano gli enti specifici della geometria. L'autenticità delle "nozioni comuni" è stata però a volte contestata. Cfr., ad esempio, [Heath *Elementi*], vol. 1, pp. 221 sgg.

all'affermazione data; in questo caso l'affermazione diviene un "teorema".

Il problema del rapporto tra i teoremi e il mondo reale, cioè della validità delle "regole di corrispondenza", evidentemente resta, ma non riguarda più il matematico in quanto tale, che, interessato a dimostrare teoremi, diviene completamente autonomo sia dalla speculazione filosofica che dalle attività professionali. Nasce così la matematica come scienza.

2.3. *L'algebra geometrica*

Mentre la descrizione del metodo assiomatico-deduttivo contenuta nel paragrafo precedente era certamente scontata per chiunque abbia studiato della matematica in una scuola secondaria, giacché il quadro delineato è quello ancora in uso, le considerazioni seguenti sono particolarmente importanti per capire la matematica ellenistica, perché riguardano un suo aspetto essenziale che la distingue dalla matematica moderna.

La matematica è stata sempre utilizzata per ottenere risultati quantitativi e il modo in cui tali risultati vengono ottenuti ne ha sempre influenzato (anche se spesso inconsapevolmente) la struttura teorica. Oggi abbiamo i calcolatori digitali. Quali erano i "mezzi di calcolo" dell' antichità classica ed ellenistica? Per i calcoli con numeri interi venivano usati vari tipi di abbaco, ma sappiamo ben poco sugli abbachi classici. Il livello delle conoscenze su questo argomento è bene illustrato da questa frase, tratta dalla più autorevole storia della tecnologia finora scritta:

> Non si conosce la forma dell'abbaco greco, mentre è ben noto il tipo romano, più progredito.[23]

L'altro strumento di calcolo, usato soprattutto per quantità non intere, era l'algebra geometrica. Essa allo stesso tempo forniva il procedimento di soluzione dei problemi e lo strumento di calcolo. Ogni problema veniva infatti tradotto in linguaggio geometrico, rappresentandone i dati con lunghezze di segmenti. Saper risolvere il problema significava saper effettuare la costruzione geometrica del segmento che rappresentava la soluzione, che veniva poi misurato. Gli strumenti usati nelle costruzioni geometriche erano la riga e il compasso, che oltre a strumenti di disegno divenivano così uno strumento analogico di calcolo. L'uso di uno strumento analogico di calcolo può sembrare strano oggi che ci siamo abituati ai calcolatori digitali, ma bisogna ricordare che fino a qualche decennio fa gli ingegneri facevano

[23] [HT], vol. 3, p. 512.

gran parte dei loro calcoli con regoli calcolatori la cui precisione era inferiore a quella raggiungibile con la riga e il compasso dell'algebra geometrica ellenistica. La soluzione ottenuta con riga e compasso aveva due caratteristiche che la rendevano particolarmente utile: innanzitutto aveva un errore relativo molto piccolo (dell'ordine del rapporto tra spessore e lunghezza di una linea disegnata) e nessuna applicazione tecnica poteva aspirare a una precisione maggiore; inoltre era facilmente riproducibile per risolvere problemi eguali con dati numerici diversi. Oggi consideriamo indipendenti tre attività che erano inscindibilmente connesse nella pratica matematica ellenistica: il ragionamento deduttivo, il calcolo e il disegno. Per il matematico greco la riga e il compasso erano essenziali per tutte e tre le cose.

Questa caratteristica della matematica ellenistica, di avere il suo principale strumento di calcolo nella riga e nel compasso, è essenziale per capirne le motivazioni e lo sviluppo, ma è raramente tenuta presente. Boyer nella sua *Storia della matematica* scrive:

> Il modo in cui i Greci definivano e studiavano le curve non può competere con la flessibilità e la portata dei metodi moderni di trattazione. Per giunta, gli antichi trascurarono quasi completamente il ruolo che curve di vario genere svolgono nel mondo che ci circonda. Sebbene fossero tra i popoli più dotati di senso artistico di tutti i tempi, le uniche curve che essi trovarono in cielo e sulla terra erano combinazioni di cerchi e di rette. [24]

Trovare in cielo e sulla terra combinazioni di cerchi e di rette significava riuscire a ridurre la soluzione di problemi sia "terreni" che astronomici a calcoli eseguibili con strumenti elementari quali la riga e il compasso. [25] La critica di Boyer equivale ad accusare gli scienziati contemporanei di infinita povertà intellettuale perché, usando i calcolatori digitali, non riescono a immaginare altro che combinazioni di 0 e 1.

Peraltro i Greci, sin dal periodo ellenico, avevano considerato anche curve non tracciabili con riga e compasso. Ad esempio essi sapevano che la quadratrice di Ippia (che è la curva descritta dal punto intersezione di un segmento in moto traslatorio uniforme con un segmento in moto rotatorio uniforme) permetteva di "risolvere" i problemi della trisezione dell'angolo e della duplicazione del cubo, ma tale soluzione veniva considerata una pseudosoluzione (era detta una "soluzione sofistica"). Perché? Evidentemente perché trasferiva il problema di trisecare l'ango-

[24] [Boyer], p.184.

[25] Quanto lontano si possa andare con "combinazioni di cerchi" non solo era chiaro in epoca ellenistica, ma dovrebbe esserlo ancora oggi a chiunque abbia studiato le espansioni in serie di Fourier.

lo (o di duplicare il cubo) a quello di costruire una macchina che realizzasse in pratica i due moti sincronizzati, tracciando il punto di intersezione. Una tale macchina era certamente realizzabile, ma non con la stessa precisione con cui si potevano tracciare segmenti e cerchi con riga e compasso e soprattutto non in modo altrettanto riproducibile e non con una precisione altrettanto facilmente controllabile.

La propensione da parte dei matematici ellenistici verso le soluzioni ottenibili con riga e compasso è stata spesso considerata un pregiudizio intellettuale. In realtà i geometri che proponevano soluzioni "sofistiche" come quella prima descritta si trovavano più o meno nelle stesse condizioni di chi oggi proponga di risolvere un problema di fisica non trovando una soluzione teorica traducibile in un algoritmo eseguibile da un calcolatore digitale, ma mediante un "calcolatore" analogico che misuri la grandezza fisica voluta dopo aver riprodotto il fenomeno in esame: un procedimento di questo tipo può certamente essere utile, ma nessuno direbbe che esso fornisce una vera "soluzione" del problema.

Archimede nell' *Arenario* introduce un sistema di numerazione equivalente non solo al nostro metodo posizionale[26] ma anche alla attuale notazione esponenziale. Nonostante l'elaborazione di un sistema analogo anche da parte di Apollonio[27] e l'introduzione dello zero,[28] non risulta, tuttavia, che la notazione posizionale si sia molto diffusa, essendo per lo più il suo uso limitato al sistema di numerazione sessagesimale usato in astronomia e in trigonometria.[29] Si può immaginare che l'ef-

[26] Il primo sviluppo della notazione posizionale era avvenuto in realtà nella matematica paleobabilonese. In quel caso si era però trattato di una inconsapevole evoluzione millenaria (descritta in [Neugebauer, ESA], pp. 30-45) che non aveva portato prima dell'epoca ellenistica a un sistema completamente coerente e privo di ambiguità. Nel caso di Archimede si tratta invece dell'introduzione di un sistema di numerazione effettuato nella piena consapevolezza della convenzionalità di tali sistemi.

[27] Un resoconto del sistema di Apollonio è in Pappo, *Collezione*, II, 6-28 (ed. Hultsch).

[28] Lo zero si trova usato sistematicamente in Mesopotamia nella notazione sessagesimale dal 300 a. C.; la sua eventuale storia precedente, nell'ambito della matematica babilonese, non è chiara (cfr. [Neugebauer, ESA], p. 44). Il suo simbolo attuale, trasmessoci attraverso Indiani e Arabi, è sia nelle tavole trigonometriche di Tolomeo sia in papiri di epoca tolemaica (dove è però sopralineato o altrimenti decorato); cfr. [Neugebauer, ESA], pp. 28-29.

Un tardo accenno al ruolo svolto dal numero zero in aritmetica è in Giamblico (*In Nicomachi arithmeticam introductionem*, 17-19). Giamblico per lo zero usa il termine οὐδέν (la cui lettera iniziale potrebbe aver dato origine al simbolo ancora usato).

[29] Il sistema posizionale, grazie al suo uso nei calcoli astronomici, fu importato in India insieme all'astronomia (cfr., più avanti, § 2.9).

ficienza dell'algebra geometrica abbia contribuito a bloccare la diffusione dei metodi "algebrici" di calcolo. Questa impressione sembra convalidata dal fatto che sia Archimede sia Apollonio svilupparono i loro metodi, sostanzialmente equivalenti, in stretta connessione con il problema di rappresentare numeri molto grandi e arrivarono quindi alla rappresentazione esponenziale prima che a quella semplicemente posizionale. Evidentemente il metodo dell'algebra geometrica era così efficiente che il problema di migliorarlo si poneva soprattutto nel caso in cui si dovevano trattare rapporti molto grandi, per i quali il metodo non è adatto (come rappresentare con due segmenti due numeri che differiscono di molti ordini di grandezza?). [30]

L'efficienza dell'algebra geometrica basata sulla riga e sul compasso era strettamente connessa alla possibilità di effettuare precisi disegni su fogli di papiro. La connessione tra strutture teoriche e strumenti materiali è illustrata dalla diversa evoluzione della matematica mesopotamica. L'uso, come materiale di scrittura, di tavolette di argilla (uso che, come abbiamo già ricordato, continuò anche in epoca ellenistica) non permetteva in Mesopotamia la realizzazione di disegni di precisione. La matematica mesopotamica dovette quindi basarsi su metodi numerici e non geometrici. La scarsezza di fonti, di cui abbiamo già parlato nel §1.1, [31] non permette di seguire come vorremmo gli sviluppi matematici mesopotamici in epoca ellenistica; dai pochi testi cuneiformi tradotti appare comunque chiaro che l'ellenismo segnò il passaggio da una matematica prescientifica alla scienza matematica non solo in quel mondo mediterraneo che aveva in Alessandria il suo principale centro, ma anche nel regno dei Seleucidi. [32]

Anche se nel resto del capitolo continueremo a occuparci della matematica caratterizzata dall'uso di metodi geometrici, dovremo ricordare che essa non va completamente identificata con la scienza matematica del periodo ellenistico, la quale contiene anche la diversa matematica sviluppata in Mesopotamia, cui non solo dobbiamo l'introduzione dello zero, ma anche lo sviluppo di quei metodi algebrici che, in parte ripresi ad Alessandria in età imperiale (prima da Erone e successivamente, soprattutto, da Diofanto) riaffioreranno poi in alcuni sviluppi delle matematiche indiana e cinese.

[30] Un altro caso nel quale l'algebra geometrica era insufficiente era quello delle tavole trigonometriche (cfr., più avanti, p. 76).

[31] Tra le tavolette di argilla risalenti all'epoca seleucide ne sono state trovate anche molte di contenuto matematico, ma anche in questo caso si tratta per la massima parte di materiale che non è mai stato pubblicato né tradotto. Cfr. [Neugebauer, ESA], pp. 79-82.

[32] Cfr. [Neugebauer, ESA], p. 68.

2.4. *La matematica del discreto e il concetto di infinito*

Negli *Elementi* sono oggetto di studio sia i "numeri", cioè gli interi, sia le "grandezze", cioè le quantità continue. Come esempio di teorema riguardante i numeri interi ricordiamo la famosa dimostrazione dell'infinità dell'insieme dei numeri primi. L'enunciato del teorema di Euclide (proposizione 20 del IX libro) è: "Vi sono più numeri primi che in ogni insieme [finito] assegnato di numeri primi".

La dimostrazione è la seguente. Se E è l'insieme finito assegnato di numeri primi, sia k il numero ottenuto moltiplicando tra loro tutti i numeri appartenenti a E e aggiungendo 1 al risultato. k non può evidentemente essere multiplo di nessuno degli elementi di E diversi da 1. Se m è un fattore primo di k diverso da 1, m non può quindi appartenere all'insieme E. Abbiamo quindi trovato un numero primo non appartenente all'insieme dato.

Alcune osservazioni:

- La sempre più diffusa ignoranza dei classici della matematica ha diffuso in molte persone la buffa convinzione che l'uso di concetti quali quelli di "insieme" e di "appartenenza" sia una novità della "matematica moderna".
- Si legge spesso che nell'Antichità non si usava in matematica il concetto di infinito. Ad esempio M. Kline ha scritto:

> Nella scienza greca il concetto di infinità è poco capito e apertamente evitato. [...]
> Il concetto di un processo senza fine li atterriva [i Greci] ed essi si ritraevano dinanzi "al silenzio degli spazi infiniti". [33]

Affermazioni analoghe si trovano in molte storie della matematica, come in quella di Boyer già citata.

Quella appena esposta è una dimostrazione rigorosa dell'infinità di un insieme. Euclide, conoscendo molto bene la delicatezza del concetto di infinito, che era chiara almeno dal tempo di Zenone, riesce a ottenere una dimostrazione rigorosa senza trattare mai direttamente gli infiniti, ma riducendo il problema allo studio di quantità finite. È proprio ciò che fa l'analisi matematica contemporanea. Il fatto che Euclide non usi la parola "infinito" è evidentemente del tutto irrilevante. [34] Ritorneremo

[33] [Kline], p.63.

[34] La parola "infinito" non è comunque una novità introdotta dai matematici moderni; tale parola è infatti la traduzione letterale del termine ἄπειρος, che, dopo una lunga e complessa storia, fu infine usato in epoca ellenistica nel significato attuale di "infinito matematico" (in questo senso il termine è usato, ad esempio, da Apollonio di Perga).

su questa questione nel §10.8, cercando di capire meglio l'origine dell'opinione che Kline ha condiviso con tanti altri autori.

• Nei manoscritti la dimostrazione era corredata di figure, dove gli elementi dell'insieme E erano rappresentati da segmenti multipli di una stessa unità di misura. Euclide non parla di prodotto, ma del più piccolo segmento multiplo di tutti i segmenti dati.[35] Tale era la forza dell'algebra geometrica che evidentemente si preferiva considerare anche i numeri interi come misure di segmenti.

2.5. *La matematica del continuo*

L'uso, accanto agli interi, delle "grandezze", cioè delle quantità continue, poneva dei difficili problemi. Pensiamo alle "grandezze" dei segmenti. Per operare con queste "grandezze" occorre saper eseguire le operazioni aritmetiche fondamentali. L'addizione non pone problemi. Se a e b sono le grandezze di due segmenti, la somma $a+b$ sarà la grandezza del "segmento somma", ottenuto, in modo naturale, prolungando il primo segmento di un segmento eguale al secondo. Analogamente si definisce la differenza. Osserviamo che queste regole sono quelle che permettevano effettivamente di eseguire le operazioni di addizione e di sottrazione di quantità non intere con il metodo dell'algebra geometrica. Per il prodotto la cosa era altrettanto semplice. Il prodotto ab era concepito infatti come la grandezza di un rettangolo di cui a e b rappresentavano le grandezze dei lati.[36] Ma quale significato si poteva dare al rapporto a/b? Tali rapporti erano indispensabili per poter considerare delle "proporzioni" del tipo $a/b=c/d$ e queste a loro volta erano essenziali nella teoria della similitudine. Ma anche se è "intuitivo" cosa significhi che tra due segmenti a e b vi è lo stesso "rapporto" che tra c e d, non è affatto chiaro il significato del rapporto a/b in sé. Analizzando meglio la questione, è facile rendersi conto che, come accade sempre quando si capisce qualcosa solo "intuitivamente", in realtà è chiara solo la situazione che si vuole modellare, ma non la costruzione del modello.

Naturalmente l'operazione di addizione tra grandezze indu-

[35] L'interpretazione geometrica di Euclide è resa possibile dal fatto che, poiché gli elementi di E sono numeri primi, il loro prodotto coincide con il loro minimo comune multiplo.

[36] Questo modo di concepire i prodotti li rendeva grandezze non omogenee ai fattori, rendendo insensata, ad esempio, un'espressione del tipo $a+ab$, con a e b lunghezze. Si introduceva così un "controllo dimensionale" automatico.

ce in modo ovvio l'operazione di moltiplicazione di una grandezza per un numero naturale: se k è un naturale, il prodotto ka può infatti essere definito come la somma di k grandezze tutte eguali ad a. Se si trovano due interi, k e h, tali che $ka=hb$, il rapporto a/b potrà essere definito come il rapporto tra interi h/k. Il rapporto a/b può cioè, in questo caso, essere definito come una "frazione". Se non è possibile trovare due interi h e k che verificano la relazione $ka=hb$, si dice che a e b sono incommensurabili. Resta quindi il problema di definire il rapporto tra due grandezze in questo secondo caso, che si verifica effettivamente, ad esempio, se a e b rappresentano le grandezze del lato e della diagonale di un quadrato, come mostra un adattamento dell'argomento pitagorico citato nel § 2.1. Si dice allora che il rapporto a/b è "irrazionale",[37] oppure, usando il linguaggio moderno, un "numero reale" non esprimibile con una frazione. Il problema che si poneva era quindi, nel nostro linguaggio, quello di fondare una teoria rigorosa dei numeri reali.

Questo problema viene risolto da Euclide in modo mirabile nella sua definizione di proporzione (definizione 5 del V libro degli *Elementi*):

> Si dice che una prima grandezza è con una seconda nello stesso rapporto in cui una terza è con una quarta, quando, se si considerano equimultipli qualsiasi della prima e della terza e altri equimultipli qualsiasi della seconda e della quarta, i primi equimultipli sono ambedue maggiori o ambedue eguali o ambedue minori degli altri equimultipli presi nell'ordine corrispondente.

Traducendo la definizione euclidea nel linguaggio algebrico, oggi più familiare, si dice che è $a/b=c/d$ quando, comunque presi due naturali h e k, si verifica sempre uno dei seguenti tre casi:

A) $ka > hb$ e simultaneamente $kc > hd$;
B) $ka = hb$ e simultaneamente $kc = hd$;
C) $ka < hb$ e simultaneamente $kc < hd$.

Anche nel caso di grandezze incommensurabili, si riesce così a definire l'eguaglianza dei rapporti usando solo l'operazione di moltiplicazione per un numero naturale.

La definizione euclidea di proporzione fu a lungo criticata dai matematici moderni, che non riuscivano a comprendere la

[37] Osserviamo che la parola attuale conserva il ricordo dell'impossibilità, per la "matematica ellenica", di considerare il rapporto in questi casi. La parola moderna "irrazionale" non è infatti che la traduzione letterale del termine ἄλογος, che originariamente esprimeva questa impossibilità e che assunse il significato attuale nella matematica ellenistica.

necessità di una definizione così complessa. Cercheremo di spiegare in seguito il motivo profondo di questa incomprensione. Essa fu finalmente recuperata da Weierstrass e Dedekind, che fondarono la moderna teoria dei numeri reali essenzialmente traducendo la definizione 5 nel linguaggio attualmente usato. La traduzione,[38] nei termini usati da Dedekind, è in sostanza la seguente. Se chiamiamo "numero reale" ogni possibile "rapporto" euclideo, la definizione euclidea si traduce nel fatto che un "numero reale" è univocamente determinato dal suo comportamento rispetto a ogni coppia (h, k) di interi, è individuato cioè dagli insiemi di coppie per i quali si verificano rispettivamente i casi A, B o C. Gli insiemi corrispondenti ai casi A e C sono chiamati da Dedekind "classi contigue di numeri razionali", e sono chiaramente sufficienti per individuare il rapporto a/b, cioè il "numero reale". I primi lavori sulla "moderna" teoria dei numeri reali risalgono al 1872.[39]

Sulla teoria delle proporzioni di Euclide Heath scrive:

> Non occorrono altri argomenti per mostrare la grandezza di questa teoria dopo aver ricordato che la definizione di rapporti eguali di Euclide (Def. 5 del V libro) corrisponde esattamente alla moderna teoria degli irrazionali dovuta a Dedekind e coincide parola per parola con la definizione di Weierstrass di numeri [reali] eguali.[40]

Come altri autori che incontreremo in casi analoghi, anche Heath (che è stato uno dei maggiori storici moderni della scienza antica) considera massima gloria dei matematici greci l'essere riusciti ad anticipare le teorie moderne; egli sembra quasi suggerire, in questo passo, che la "coincidenza parola per parola" da lui notata possa dipendere dalla capacità di Euclide di anticipare risultati successivi di millenni, piuttosto che, più semplicemente, dal fatto che Weierstrass aveva formulato una definizione "coincidente parola per parola" con quella, a lui ben nota, di Euclide.

Quanti altri secoli avremmo dovuto aspettare per una "moderna" teoria dei numeri reali se gli *Elementi* di Euclide non fossero stati il libro di testo cui risaliva la prima formazione matematica di Weierstrass e di Dedekind?

[38] Ovviamente questa "traduzione" nel linguaggio moderno ha portato a notevoli modifiche. In particolare la concezione moderna della struttura algebrica dell'insieme dei numeri reali è nuova e nasce dal fatto di privilegiare l'aspetto algebrico su quello geometrico. Si tratta però di mutamenti che, per quanto importanti, non contraddicono il fatto fondamentale che la teoria "moderna" nacque recuperando la definizione di Euclide.

[39] Si tratta di un articolo di Dedekind e di un altro di Heine, basato però sulle idee del suo maestro Weierstrass.

[40] [Heath HGM], vol. 1, pp. 326-327.

2.6. *Euclide e i suoi predecessori del IV secolo a.C.*

Secondo una diffusa convinzione, il contenuto degli *Elementi* sarebbe stato esposto già prima di Euclide in trattati analoghi, che non si sarebbero conservati. Tale convinzione è basata essenzialmente sul fatto che prima di Euclide erano certamente già note la massima parte degli enunciati dei teoremi contenuti negli *Elementi*[41] ed erano state già effettuate molte dimostrazioni, anche complesse.[42] Bisogna però osservare che anche la dimostrazione rigorosa di singoli teoremi o gruppi di teoremi, la dimostrazione cioè che alcune affermazioni ne implicano altre, pure essendone un presupposto essenziale, non è sufficiente perché vi sia "scienza matematica". Ciò che caratterizza il livello pienamente "scientifico" della matematica è la presenza di una unica "rete" indefinitamente estendibile di teoremi, ricavabili tutti da un piccolo numero di affermazioni ben individuate. Per giudicare l'originalità degli *Elementi* occorre quindi chiedersi se una simile struttura (senza la quale non è possibile estendere la teoria facendo "esercizi"; è questo il punto essenziale!) fosse stata ottenuta prima di Euclide.

Nessuno dei cinque postulati di Euclide è attestato nei frammenti rimastici sulla matematica pre-euclidea,[43] né vi sono documentati insiemi alternativi di postulati. La testimonianza più significativa su questo punto, anche per motivi cronologici, è quella di Aristotele. In un passo nel quale discute della funzione dei principi delle scienze dimostrative, Aristotele distingue tra principi comuni a tutte le scienze e principi particolari di ciascuna di esse. Come esempio del primo tipo egli cita l'affermazione "se da cose eguali si sottraggono cose eguali i rimanenti sono eguali", che è inclusa negli *Elementi* appunto come una delle "nozioni comuni". Subito prima Aristotele aveva scritto: "Principi particolari sono quale è la linea e cosa è retto, ...".[44]

È evidente la differenza tra il tipo di "principi geometrici" esemplificato da Aristotele, che non potevano certo essere la vera base della dimostrazione di teoremi, e i postulati contenuti negli *Elementi*.

[41] Heath, parlando dei primi quattro libri degli *Elementi*, afferma che il loro contenuto era praticamente completo al tempo di Platone ([Heath *Elementi*], vol. 1, p. 216).

[42] Ricordiamo, ad esempio, la costruzione dei due medi proporzionali a opera di Archita e la dimostrazione di Eudosso delle formule dei volumi della piramide e del cono (dimostrazioni ambedue risalenti alla prima metà del IV secolo).

[43] Heath afferma: "Io penso che il famoso V postulato sia dovuto proprio a Euclide e sembra probabile che anche il IV postulato sia suo, se non anche i primi tre postulati" ([Heath *Elementi*], vol. 1, p. 375).

[44] Aristotele, *Analytica posteriora*, I, 10, 76a, 40.

Non vi è in definitiva alcun motivo per supporre che l'unità logica degli *Elementi* (che evidentemente non è dovuta al caso, ma è il frutto del lavoro consapevole dello stesso matematico cui dobbiamo la scelta dei postulati) non sia una novità, di grande importanza, introdotta da Euclide.

La definizione euclidea di proporzione è sempre citata come la "definizione di Eudosso". Perché la definizione più profonda degli *Elementi* è accreditata a Eudosso, del quale non ci sono rimaste opere? Questa attribuzione è fondata su due elementi: il primo è uno scolio anonimo, che si ritiene essere di Proclo; vi si afferma che "qualcuno dice che il contenuto del V libro è una scoperta di Eudosso, il maestro di Platone"[45]; il secondo elemento consiste nell'attribuzione a Eudosso, da parte di Archimede, della dimostrazione rigorosa delle formule del volume della piramide e del cono,[46] dimostrazione che dopo Euclide è stata fondata sulla definizione di proporzione contenuta negli *Elementi*.

Uno scolio anonimo che cita l'opinione di un altro anonimo su fatti avvenuti quasi un millennio addietro è lontano dal costituire una prova, soprattutto se attribuisce una scoperta a un celebre personaggio dell'Antichità, massimo matematico di una famosissima scuola al quale l'anonimo stesso probabilmente appartiene (Proclo è un neoplatonico ed Eudosso è associato strettamente a Platone, se non altro nell'opinione dell'autore dello scolio).

Aristotele, che conosce Eudosso e non può conoscere Euclide, che gli è posteriore, usa una definizione di proporzionalità più rozza di quella euclidea.[47] Sulla base di questo passo Heiberg si convinse che la definizione 5 fosse originale di Euclide.[48] Se Eudosso avesse già introdotto la proporzionalità nel senso nuovo cui Aristotele non accenna, bisognerebbe infatti supporre che Aristotele non ne avesse colto la novità e l'importanza. Sembra più ragionevole attribuire questo atteggiamento alla anonima fonte dell'anonimo autore dello scolio piuttosto che ad Aristotele.

Archimede non lascia dubbi sul fatto che Eudosso fosse riuscito a fornire dimostrazioni rigorose dei teoremi attribuitigli,

[45] [Euclidis OO], vol. V, p. 280.

[46] Archimede (ed. Mugler): *Sulla sfera e sul cilindro*, I, 9, 2-11; *Sul metodo*, 84, 3-10.

[47] Aristotele, *Topica*, VIII, 3, 158b, 29.

[48] [Heiberg MA]. Heath respinge l'interpretazione di Heiberg con l'argomentazione che, essendo la definizione 5 usata sistematicamente in tutto il V libro, bisognerebbe dedurne che (contrariamente alla tradizione trasmessa dallo scolio) tutto il V libro degli *Elementi* è di Euclide ([Heath: *Elementi*], vol. 2, p. 121).

nel senso che esse includevano un trattamento rigoroso degli infinitesimi. Una tale testimonianza è certo sufficiente per considerare il contributo di Eudosso di importanza cruciale per la nascita della scienza matematica. Ma, d'altra parte, una cosa è elaborare uno strumento matematico raffinato in un caso specifico e un'altra è individuare le definizioni e gli assiomi sui quali fondare la matematica. Questo secondo passo può essere compiuto solo successivamente e non vi è alcuna prova che Eudosso abbia fatto anche questo. La testimonianza di Archimede, che attribuisce a Eudosso due teoremi particolari e non un metodo generale, né postulati o definizioni nuove, sembra piuttosto una forte indicazione in senso opposto.

L'ipotesi più plausibile sembra quella che Euclide avesse dato una nuova definizione di proporzione, basandola sulla proprietà che Eudosso aveva individuato e usato per dimostrare alcuni teoremi particolari. Se il contributo di Euclide, anche in questo caso, fu quello di elaborare la struttura unitaria in cui inserire gli argomenti sviluppati in precedenza, non stupisce che commentatori della tarda Antichità, interessati a un lavoro analitico di esegesi, l'abbiano gravemente sottovalutato e, riconoscendo nel V libro degli *Elementi* gli argomenti già usati da Eudosso, ne abbiano senz'altro retrodatato a lui tutto il contenuto.

2.7. *Un'applicazione del "metodo di esaustione"*

Come esempio di applicazione di quello che in età moderna fu detto "metodo di esaustione", ossia di analisi matematica ellenistica, ricordiamo come Archimede nella *Quadratura della parabola* calcolò l'area di un segmento di parabola. Si tratta probabilmente della più semplice delle dimostrazioni di Archimede che ci sono rimaste (e per questo motivo è stata anche la più popolare), ma può servire a dare un'idea, se non della capacità di Archimede di risolvere problemi difficili, almeno del suo livello di rigore.

Sia data una parabola. Se A e B sono due punti della parabola, la parte di piano racchiusa tra il segmento AB e l'arco di parabola compreso tra A e B si chiama segmento di parabola di base AB. Il punto C dell'arco di parabola che si trova alla massima distanza dalla retta AB viene detto vertice del segmento di parabola considerato.[49]

[49] Tale "vertice" del segmento di parabola dipende dalla base AB e non va confuso con il vertice della parabola, che è un punto in genere diverso.

La dimostrazione di Archimede è basata su un postulato di natura fondamentale, discusso all'inizio dell'opera, e tre lemmi tecnici.[50]

Postulato. Se due aree sono diseguali, esiste un multiplo della differenza che supera qualsiasi area precedentemente fissata.

Lemma 1. Se C è il vertice del segmento di parabola di base AB, l'area del triangolo ABC è maggiore della metà dell'area del segmento di parabola.

Dal punto di vista tecnico l'ingrediente fondamentale della dimostrazione è contenuto nel lemma seguente, la cui dimostrazione, insieme a quella del lemma precedente, è riportata in appendice.

Lemma 2. Se C è il vertice del segmento di parabola di base AB e D è il vertice del segmento di parabola di base CB, l'area del triangolo CBD è 1/8 di quella del triangolo ABC.

L'idea fondamentale di Archimede è quella di coprire la superficie del segmento di parabola con infiniti triangoli. A questo scopo egli inscrive nel segmento di parabola di base AB il triangolo ABC. La figura di cui si vuole calcolare l'area risulterà così divisa in tre parti, delle quali una è il triangolo ABC e le altre due sono ancora segmenti di parabola, in ciascuno dei quali, con lo stesso sistema, si possono ancora inscrivere dei triangoli (come il triangolo CBD in figura). Il procedimento di inscrizione di triangoli può naturalmente essere iterato, ottenendo triangoli sempre più piccoli. Chiamiamo S l'area del segmento di parabola considerato inizialmente, A_0 l'area del triangolo ABC in esso inscritto, A_1, A_2, A_3, ...l'area totale dei triangoli inscritti nei successivi passi del procedimento iterativo. Poiché in ciascuna iterazione il numero dei triangoli raddoppia mentre la loro area, per il lemma 2, viene divisa per 8, è chiaro che: $A_1 = (1/4)A_0$,

[50] La presente esposizione differisce leggermente da quella originale, che contiene un numero maggiore di proposizioni.

$A_2 = (1/4)\ A_1$ e così via. A questo punto Archimede prova il lemma seguente:

Lemma 3. Se $A_0, A_1, A_2, \ldots, A_n$ sono una successione finita di grandezze, ciascuna quadrupla della successiva, si ha:

$$A_0 + A_1 + A_2 + \ldots + A_n + (1/3)\ A_n = (4/3)\ A_0. \quad (*)$$

Non riportiamo la dimostrazione di questo lemma, notando solo che si tratta di un caso particolare di una proprietà oggi ben nota delle progressioni geometriche.

Archimede può ora calcolare l'area S del segmento di parabola dimostrando il teorema seguente:

Teorema. $S = (4/3)\ A_0$.

Il teorema viene dimostrato per assurdo, dimostrando cioè che non può essere né $S > (4/3)\ A_0$ né $S < (4/3)\ A_0$. Supposto che sia $S > (4/3)\ A_0$, chiamiamo E la differenza $S - (4/3)\ A_0$. Avremo allora:

$$S = A_0 + A_1 + A_2 + \ldots + A_n + \varepsilon_n = (4/3)\ A_0 + E,$$

avendo indicato con ε_n l'area della parte del segmento di parabola non coperta da triangoli dopo n iterazioni. Se n è abbastanza grande, l'area ε_n, riducendosi a ogni passo, per il lemma 1, di un fattore maggiore di 2, risulterà inferiore a E, per il postulato prima enunciato. Dovrà allora essere:

$$A_0 + A_1 + A_2 + \ldots + A_n > (4/3)\ A_0.$$

L'ultima diseguaglianza è però falsa, in quanto contraddice la (*). Abbiamo così escluso il caso $S > (4/3)\ A_0$.

Supponiamo ora che sia $S < (4/3)\ A_0$. Usando di nuovo il postulato, si vede che se n è un intero sufficientemente grande l'area $(1/3)\ A_n$ deve essere minore della differenza $(4/3)\ A_0 - S$. Usando la (*) si ha allora:

$$(4/3)\ A_0 < A_0 + A_1 + A_2 + \ldots + A_n + (4/3)\ A_0 - S,$$

cioè:

$$S < A_0 + A_1 + A_2 + \ldots + A_n.$$

L'ultima diseguaglianza è chiaramente falsa, poiché il secondo membro rappresenta l'area di una parte del segmento di parabola di area S. La dimostrazione del teorema è così completa.

Osserviamo che la dimostrazione è basata in modo essenziale (come è più chiaro dalla lettura dell'appendice) sullo studio di triangoli, che mancano totalmente nella formulazione del teorema. Essi vengono usati solo strumentalmente. Questo esempio chiarisce perché venissero elaborate con tanta cura teorie semplici come quella sui triangoli esposta negli *Elementi* di Euclide: si trattava di strumenti utili per affrontare anche problemi posti inizialmente in termini del tutto estranei alla teoria considerata. I triangoli, in particolare, venivano studiati per poter "triangolare" le figure. Vedremo un analogo uso strumentale dei cerchi nello studio delle orbite dei pianeti.

Ogni numero reale diverso da zero possiede un multiplo maggiore di qualsiasi numero reale prefissato. Nelle moderne teorie assiomatiche dei numeri reali questa proprietà è assunta con il nome di "assioma di Archimede". Il postulato realmente enunciato da Archimede non coincide con tale assioma. Le "grandezze" considerate da Archimede (e in genere dai matematici ellenistici) costituiscono infatti un insieme che secondo la moderna terminologia è "non archimedeo", in quanto la grandezza di un segmento, pur non essendo nulla, non ha alcun multiplo che superi la grandezza di un quadrato. Secondo i matematici ellenistici due grandezze "hanno un rapporto" se ciascuna delle due possiede un multiplo maggiore dell'altra.[51] Archimede postula esplicitamente la proprietà di due superfici diverse di avere una differenza "omogenea a" (cioè dotata di rapporto con) tutte le altre superfici.[52] La nostra terminologia differisce da quella ellenistica in quanto noi costruiamo le "grandezze" (cioè le "lunghezze", le "aree" e i "volumi") usando il concetto di "numero reale", il cui analogo ellenistico (cioè il rapporto tra grandezze omogenee) è, inversamente, derivato dalle proprietà delle "grandezze".

Il livello di rigore e di profondità di Archimede (del quale abbiamo potuto dare una ben pallida idea) è tale da suggerire una domanda: come mai la tarda antichità e il Medio Evo ci hanno conservato alcune sue opere? Forse la selezione effettuata non è stata di così basso livello come sostenuto nel capitolo precedente? In realtà i criteri di selezione di cui abbiamo parlato hanno un'ulteriore conferma in questo caso, giacché ci sono pervenute alcune opere di Archimede solo grazie a una serie di circostanze eccezionalmente fortunate. Nonostante la fama del loro autore, sembra infatti che diversi degli scritti di Archimede (tra i quali

[51] Euclide, *Elementi*, V, def. 4.

[52] Una versione più generale del postulato (riguardante non solo le superfici, ma anche linee e grandezze solide) è enunciata da Archimede nell'opera *Sulla sfera e sul cilindro* (I, 11, 16-20; ed. Mugler).

La Quadratura della parabola) siano sopravvissuti per secoli in un'unica copia: un codice preparato a Bisanzio nel IX secolo. Questo manoscritto, oggi scomparso, appartenne a Federico II di Svevia e dopo la battaglia di Benevento (1266) finì nella Biblioteca Vaticana; esisteva ancora nel XV secolo, quando fu copiato in Francia e in Italia, ma non se ne hanno più notizie nel secolo successivo. Di un altro manoscritto, che conteneva opere diverse e probabilmente era stato donato al papa insieme al primo, si perdono le tracce già nel XIV secolo. Da questo secondo manoscritto era stata derivata una versione latina del trattato sui galleggianti. L'unica altra fonte per le opere di Archimede è il palinsesto, cui abbiamo già accennato, trovato da Heiberg nel 1906.

Se non avessimo alcune sue opere, la nostra conoscenza di Archimede si ridurrebbe alle notizie tramandate da autori come Plutarco, Ateneo, Vitruvio ed Erone; saremmo cioè esattamente nelle condizioni nelle quali ci troviamo, ad esempio, per Ctesibio: scienziato che, sulla base di queste stesse fonti, ci apparirebbe non meno interessante. Circostanze quali la conservazione per sei secoli di un codice posseduto successivamente da Bizantini, Normanni,[53] Svevi, Angioini, papi e umanisti fiorentini sono ben difficilmente ripetibili. In quanti altri casi non siamo stati altrettanto fortunati?

2.8. *Il "costruttivismo" della matematica ellenistica*

Nelle opere matematiche ellenistiche sopravvissute è riconoscibile una concezione degli enti matematici basata su un atteggiamento filosofico molto lontano da quello del periodo classico: completamente diverso, in particolare, da quello presente nelle opere di Platone e di Aristotele. Secondo quest'ultima concezione, che chiameremo "platonica" perché enunciata in maniera particolarmente limpida da Platone, gli enti matematici hanno una propria realtà oggettiva e al matematico spetta solo la loro descrizione e uso.[54] Tale concezione dominò in età imperiale, nel Medio Evo e nei primi secoli dell'età moderna.

[53] Il codice archimedeo, compilato a Bisanzio nel IX secolo per iniziativa di Leone il matematico, giunse alla corte normanna di Sicilia nel XII secolo.

[54] Aristotele, in realtà, aveva criticato a lungo la concezione di Platone degli enti matematici (cfr., in particolare, *Metaphysica*, XI, 4; XIII; XIV), sostenendo che tali enti non fossero immanenti ai corpi, né avessero un'esistenza separata. La posizione di Aristotele può essere approssimativamente sintetizzata affermando che gli enti matematici hanno un'esistenza di tipo particolare, in quanto esistono solo come proprietà dei corpi sensibili. Nonostante la base filosofica della concezione di Aristotele sia diversa da quella di Platone, la differenza non è tale da mutare in modo rilevante l'atteggiamento verso il lavoro

La diversa concezione degli enti matematici propria degli scienziati ellenistici non è solo implicita nelle opere matematiche conservate, ma fu anche esplicitamente teorizzata. Sappiamo infatti da Proclo che Apollonio di Perga aveva discusso i concetti geometrici fondamentali descrivendone la genesi a partire dall'esperienza quotidiana, in particolare spiegando come il concetto di linea nasca dalla considerazione di oggetti, quali le strade, dei quali si può chiedere a qualcuno di misurare "la lunghezza" con la certezza di essere capiti. [55]

Per illustrare la concezione di Euclide (rinviando al §9.1 l'analisi delle prime definizioni del I libro, che sembrano in contraddizione con la tesi che stiamo illustrando) può essere significativa una sua scelta terminologica. Il concetto di punto (στιγμή) era stato a lungo analizzato in epoca pre-ellenistica all'interno della concezione che abbiamo chiamato "platonica". Le analisi del concetto di punto contenute nelle opere di Aristotele erano state di questo tipo. [56] Euclide evita nella sua opera il termine στιγμή, preferendo parlare di σημεῖον, cioè di *segno*. [57] Il primo postulato degli *Elementi* nel testo di Euclide era letteralmente:

> Sia stato richiesto di [poter] tracciare una linea dritta da ogni segno a ogni segno. [58]

Non avrebbe potuto esservi un modo più chiaro per tagliare i ponti con tutta la tradizione di speculazioni "platoniche" sulla vera natura del punto e per evidenziare come la matematica non fosse lo studio di enti dotati di realtà oggettiva, ma un modello di particolari attività umane, in questo caso del disegno. Osserviamo incidentalmente che mentre nel primo ellenismo (in particolare nelle opere di Archimede e di Apollonio) si usò esclusivamente il termine euclideo, in età imperiale il termine στιγμή finì con il riacquistare la supremazia, come dimostrato dal fatto che l'attuale "punto" è la traduzione letterale (attraverso il latino) non del termine euclideo, ma di quello usato da Pla-

del matematico; da questo punto di vista l'essenziale è che per Aristotele, come per Platone, l'uomo non costruisce gli enti matematici, che, in un modo o nell'altro, gli preesistono.

[55] Cfr. Proclo, *In primum Euclidis elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 100.

[56] Cfr., ad esempio, *Physica*, IV, 11, 220a, 15 sgg.; *Metaphysica*, V, 6, 1016b, 24-30.

[57] L'occasionale presenza del termine σημεῖον, nel significato di *punto*, in alcune opere del corpus aristotelico non è rilevante, in quanto si tratta di opere certamente rielaborate posteriormente a Euclide. Il termine ricorre, ad esempio, in alcune costruzioni geometriche contenute nei *Meteorologica* (cfr. in particolare 373a e 375b-377a), la cui redazione pervenutaci è probabilmente dovuta a un allievo di Teofrasto.

[58] Ἠιτήσθω ἀπὸ παντὸς σημεῖου ἐπὶ πᾶν σημεῖον εὐθεῖαν γραμμὴν ἀγαγεῖν.

tone e da Aristotele.[59] Il risorgere, in età imperiale, delle concezioni filosofiche pre-ellenistiche, e in particolare platoniche, aveva finito evidentemente con l'influenzare anche la terminologia matematica.

La nuova concezione degli enti matematici è evidente anche in alcune definizioni: in particolare in quella di proporzione. Infatti se si pensa ai "rapporti di grandezze" come a oggetti dotati di esistenza propria, l'eguaglianza di due rapporti appare una nozione ovvia (come apparve a Galileo[60]), mentre Euclide, come abbiamo visto nel §2.5, adotta una definizione equivalente a una complessa e raffinata elaborazione del concetto di rapporto tra due grandezze.

Gli *Elementi* di Euclide fin dai primi postulati scelgono come oggetto privilegiato di studio le rette e le circonferenze. Il motivo di questa scelta è chiaro: il ruolo della retta e della circonferenza è privilegiato perché esse sono i modelli matematici delle linee tracciabili con riga e compasso. La matematica euclidea nasce esplicitamente come la "teoria scientifica" dei disegni eseguibili con riga e compasso. I primi tre postulati di Euclide non sono altro che la chiara ed esplicita trasposizione, a livello di teoria matematica, delle operazioni normalmente effettuate con i due strumenti fondamentali. Naturalmente vi è un'enorme differenza tra la matematica e il disegno. Con un compasso non si può affatto tracciare una circonferenza di qualsiasi raggio, anzi non si può mai tracciare una vera circonferenza. La scienza matematica nasce sostituendo alla riga e al compasso una riga e un compasso ideali, modelli teorici degli strumenti reali, capaci delle operazioni descritte nei primi tre postulati; di tale modello teorico è però chiarissima sia l'origine che le "regole di corrispondenza" che ne permettono l'applicazione.

Gli enti matematici diversi da quelli fondamentali erano presi in considerazione solo se potevano essere esplicitamente costruiti a partire dai primi. I matematici ellenistici studiarono diverse altre curve oltre alle rette e alle circonferenze, come ellissi, parabole, spirali, concoidi e cissoidi, ma ogni nuova curva era introdotta descrivendone la "costruzione". I matematici non creavano, cioè, nuovi enti attraverso pure definizioni astratte, ma consideravano indispensabile la loro reale costruibilità geometrica, che costituiva la forma allora accettata di "prova di esistenza".[61] In questo senso (e cioè in un senso molto forte) si può

[59] Il significato originario di στιγμή (da στίζω, "pungo") è infatti quello di "puntura".

[60] Torneremo su questo punto a p. 302.

[61] Questo punto è stato sottolineato da Zeuthen; cfr., in particolare, [Zeuthen].

dire che la matematica ellenistica era una matematica costruttiva.

La concezione di Euclide appare con particolare evidenza confrontando il modo con cui le varie figure geometriche sono introdotte negli *Elementi* con le usuali trattazioni moderne. Euclide non usa mai una figura geometrica se non dopo averne dimostrato la costruibilità con riga e compasso: nella prima *proposizione* degli *Elementi*, ad esempio, egli dimostra come i suoi postulati implichino la costruibilità del triangolo equilatero.[62] I matematici moderni, invece, hanno spesso studiato enti matematici contentandosi di dimostrarne l' "esistenza", vista come una proprietà indipendente dalla costruibilità. Si tratta, evidentemente, di quella stessa posizione filosofica platonica che spesso è stata stranamente attribuita a Euclide.

Può sembrare che la definizione di Euclide di proporzione, come la definizione moderna di numero reale che ne è stata derivata, non sia costruttiva, in quanto richiede la considerazione di un'infinità di numeri interi. La questione può essere chiarita esaminando un'applicazione della definizione euclidea: consideriamo la dimostrazione di Euclide che il rapporto tra due cerchi è eguale al rapporto tra i quadrati costruiti sui loro diametri.[63] L' esistenza (nel senso della loro costruibilità con riga e compasso) degli enti matematici di cui si parla è già stata stabilita: quella dei cerchi è affermata nel terzo postulato, mentre la costruibilità dei quadrati è stata dimostrata precedentemente.[64] La definizione di proporzione viene usata per enunciare una relazione tra enti geometrici già costruiti, la cui validità può essere dimostrata con un numero finito di passi logici, come si può controllare leggendo la dimostrazione di Euclide. In altre parole vi è un'importante differenza tra i "rapporti di grandezze" di Euclide e i moderni "numeri reali": mentre i matematici moderni hanno introdotto assiomi riguardanti "l'insieme di tutti i numeri reali" e spesso hanno considerato numeri reali la cui "esistenza" era dimostrabile sulla base di tali assiomi, senza avere alcun procedimento per costruirli effettivamente, Euclide considera solo rapporti tra grandezze costruibili.

È facile, oggi che abbiamo a disposizione una ricchezza di "oggetti matematici" impensabile per Euclide, criticare la "scarsa generalità" dei metodi euclidei, come spesso si fa. Ma credo che una simile critica manchi completamente il bersaglio. Facciamo un esempio: i matematici dell'Ottocento studiavano, in tutta generalità, le "funzioni continue" e le "curve piane". Essi

[62] Euclide, *Elementi*, I, prop. 1.
[63] Euclide, *Elementi*, XII, prop. 2.
[64] Euclide, *Elementi*, I, prop. 46.

continuarono a credere che ogni funzione continua fosse anche derivabile (tranne eventualmente in punti isolati) finché Weierstrass, nel 1875, non mostrò l' "esistenza" (nel senso moderno del termine) di funzioni continue non derivabili in nessun punto. Analogamente i matematici moderni furono convinti che con una "curva piana" non si potesse riempire un quadrato finché Peano non dimostrò che la definizione usata di "curva piana" era compatibile con questa proprietà. La ricchezza della matematica contemporanea non è quindi una conseguenza automatica della "generalità delle definizioni" (che è compatibile con la convinzione che gli enti "generali" studiati godano di proprietà che poi si dimostrano false) ma è dovuta al lavoro dei vari Peano e Weierstrass che ci hanno fornito una ricchezza crescente di oggetti matematici "particolari"; le definizioni molto generali sono veramente utili solo se servono a inquadrarne una vasta molteplicità (soprattutto se si tratta di oggetti esplicitamente costruibili). Altrimenti, come è accaduto più volte nella storia della matematica moderna, una definizione "generalissima" (nelle intenzioni di chi l'ha formulata) può poi rivelarsi equivalente a un'altra esplicitamente molto particolare o addirittura si può scoprire che l'insieme degli enti che la soddisfano è vuoto. I matematici ellenistici non furono limitati dall'uso di definizioni "poco generali" ma, usando un metodo costruttivo che oggi appare sempre più apprezzabile, avevano formulato definizioni pienamente adeguate al mondo di oggetti matematici che avevano a disposizione e che accrescevano continuamente. Il fatto che questo mondo sia divenuto molto più ampio, dopo oltre due millenni, grazie al lavoro portato avanti negli ultimi secoli da una comunità di matematici ben più numerosa di quella ellenistica, difficilmente può essere considerato un limite metodologico degli antichi scienziati.

2.9. *La trigonometria e la geometria sferica*

Concludiamo questo capitolo sulla matematica ellenistica accennando brevemente alla trigonometria piana e sferica. Questa scelta non è dovuta all'interesse intrinseco di questi argomenti (sarebbe certo ben più interessante accennare alla teoria delle coniche di Apollonio o ai metodi algebrici esposti da Diofanto), ma all'occasione che ci offre di illustrare il metodo usato da molti storici della scienza.

Fino a qualche tempo fa era diffusa l'opinione che gli "Antichi" non conoscessero la trigonometria. In realtà i pochi risultati di questo elementare capitolo della matematica (ad esempio le cosiddette "formule di addizione") erano stati sviluppati ben

presto ed erano state anche compilate tavole trigonometriche a uso degli astronomi. L'unica differenza tra l'antica trigonometria e la nostra è nel fatto che come funzione fondamentale, invece dell'attuale seno, veniva usata la corda. Le due funzioni sono evidentemente equivalenti e si può passare dall'una all'altra con l'ovvia formula:

$$\text{corda}(\alpha) = 2\text{sen}(\alpha/2),$$

giacché il seno di un angolo non è altro che la metà della corda sottesa dall'angolo doppio.

Osserviamo che non è possibile calcolare la corda corrispondente a un arco di lunghezza assegnata con i metodi tipici dell'algebra geometrica; non è cioè possibile calcolare la funzione "corda" con riga e compasso.[65] Il fatto che l'impossibilità di risolvere questo problema (che non è altro che una delle formulazioni possibili del famoso problema della quadratura del cerchio) non abbia bloccato lo sviluppo della trigonometria, ma l'abbia indirizzata verso l'uso di mezzi di calcolo diversi dall'algebra geometrica, quali tavole numeriche scritte in notazione posizionale, dimostra come l'uso della riga e del compasso costituisse un comodo strumento e non un pregiudizio intellettuale.

Nel IV secolo d.C. la trigonometria fu importata in India insieme all'astronomia, della quale era divenuta uno strumento tecnico indispensabile.[66] Alcuni astronomi e matematici alessandrini, spinti dalla situazione sempre più difficile in cui si trovavano ad Alessandria, decisero infatti nel corso del secolo di emigrare in India.[67] Sembra, ad esempio, che il Pauliśa autore del lavoro astronomico indiano *Pauliśa siddhānta* fosse l'astronomo Paulus, profugo da Alessandria.

I matematici indiani, dovendo usare spesso delle "mezze corde", preferirono usare queste ultime come variabili. Essi finirono anche con l'usare il termine indiano per corda, *jīva*, per indicare la "metà di una corda". Gli Arabi, invece di tradurre il ter-

[65] Ovviamente è possibile, con la sola riga, disegnare la corda corrispondente a un arco dato, ma per calcolare la funzione corda con riga e compasso bisognerebbe costruire con questi strumenti la corda di un arco la cui lunghezza sia pari a quella di un segmento assegnato; la costruzione di un tale arco è essenzialmente equivalente all'operazione inversa, consistente nella "rettificazione" della circonferenza.

[66] Sembra certo che la prima importazione in India di metodi astronomici provenienti dall'Occidente risalga al II secolo d.C.; si trattava però di metodi aritmetici mesopotamici, usati in testi astrologici greci; cfr. [Neugebauer, HAMA], p. 6. L'uso indiano in astronomia di metodi geometrici, che richiedevano funzioni trigonometriche, risale invece al IV secolo.

[67] La fine di Ipazia all'inizio del secolo successivo (che abbiamo già ricordato a p. 29) suggerisce che probabilmente non si trattò di una cattiva idea.

mine indiano, lo traslitterarono con la parola araba *jīb*, che significa "cavità" e che per questo, successivamente, fu tradotta con la parola latina "sinus".[68] Si trattava comunque di un banalissimo cambio di variabili, che permetteva di eliminare qualche fattore 2 in alcune formule, senza alterare in nulla i teoremi della trigonometria ellenistica, che abbiamo recuperato intatti, al di là del vuoto rappresentato dai Romani e dai regni romano-barbarici, attraverso la complicata mediazione di Indiani e Arabi.

Uno storico della scienza scrive:

> L'elaborazione del sistema di notazione per gli interi ancor oggi in uso costituisce uno dei due più importanti contributi dell'India alla storia della matematica. L'altro fu rappresentato dall'introduzione di un concetto equivalente alla funzione seno nella trigonometria in sostituzione delle tavole delle corde della matematica greca.[69]

E un altro:

> Non conoscendo ancora le ordinarie funzioni trigonometriche (seno, coseno, ecc.), Tolomeo adopera a questo fine il così detto calcolo delle corde, fondato sulle proprietà delle corde considerate in funzione dell'arco sotteso. Toccherà ai matematici arabi (e sarà uno dei loro meriti più notevoli, come vedremo nella sezione II) porre in luce gli incontestabili vantaggi derivanti dalla sostituzione di tale calcolo con la vera e propria trigonometria nel senso moderno del termine.[70]

Come si vede le opinioni dei due studiosi non coincidono. Il "merito" di avere diviso la corda per due viene attribuito infatti dall'uno agli Arabi e dall'altro (più informato) agli Indiani. Su un punto vi è però accordo totale: si può parlare di trigonometria (almeno di quella "nel senso moderno del termine") solo quando invece di usare le corde si usano le metà delle corde!

Questo esempio, pur nella sua banalità, è istruttivo, giacché illustra in modo particolarmente lampante un atteggiamento che, anche se nel caso della trigonometria sta scomparendo, vedremo all'opera in tanti altri casi. Esso consiste nel rivendicare l'originalità della "scienza moderna" usando la tautologia seguente. Si assume implicitamente che la scienza moderna sia di qualità superiore a quella antica, anzi l'unica vera scienza, che al più gli "Antichi" hanno potuto "prefigurare". Se ne deduce che le acquisizioni che hanno portato all'assetto attuale, anche se si tratta del cambiamento di un nome o di una divisione

[68] Cfr. [Rosenfeld], p.11.
[69] [Boyer], p. 252.
[70] [Geymonat], vol. I, p. 354.

per due, hanno la capacità di "fondare" la scienza considerata, se non altro "nel senso moderno del termine". Armati della caratterizzazione della scienza così ottenuta, si può constatare con sufficienza che "gli Antichi" non erano riusciti a elaborarla, autoconvincendosi di dedurne l'assunzione iniziale. Questo atteggiamento è stato usato anche nel caso del "metodo di esaustione", che in genere è presentato come una "prefigurazione" dei moderni metodi di passaggio al limite.[71] Come è chiaro a chi ha letto il § 2.7, Archimede non usa dei passaggi al limite solo nel senso che non usa un'espressione esattamente corrispondente alla nostra parola "limite", ma in una moderna dimostrazione di analisi basta sostituire questo termine con la sua definizione per ottenere un'esposizione del tutto equivalente a quella di Archimede.

Tornando ai matematici ellenistici, va sottolineato che essi svilupparono anche la geometria (e la trigonometria) sferica, argomenti sui quali siamo informati soprattutto attraverso le opere di Teodosio (vissuto tra il II e il I secolo a.C.), di Menelao (I secolo d.C.) e di Tolomeo (II secolo d.C.). La matematica sviluppata in questi trattati (la *Sphaerica* di Teodosio, l'omonima opera di Menelao e la *Sintassi matematica* di Tolomeo[72]), pur essendo evidentemente strumentale all'astronomia e alla geografia matematica, ha anche un grande interesse teorico. Non solo sono ricavate, infatti, le formule di trigonometria sferica che possono essere utili agli astronomi o ai geografi, ma vi è anche, in particolare nell'opera di Menelao, uno sviluppo teorico della geometria sferica "intrinseca", costruita in analogia alla geometria piana degli *Elementi* di Euclide.[73] Questo sviluppo sarà importante molti secoli dopo, come vedremo.

[71] Cfr., ad esempio, la voce *exhaustion, method of* dell' *Encyclopædia Britannica,* dove è detto che il metodo, pur precorrendo la moderna analisi, non usava limiti, né quantità infinitesime.

[72] Si tratta della principale opera di Tolomeo (più nota con il nome di *Almagesto* datole dagli Arabi), una parte della quale è dedicata appunto alla geometria e alla trigonometria sferica.

[73] L'opera di Teodosio usa invece per lo più metodi stereometrici; i teoremi sulla superficie sferica sono cioè dimostrati come teoremi di geometria solida, usando lo spazio tridimensionale in cui la superficie è immersa; anche Teodosio usa però a volte metodi di geometria sferica "intrinseca".

3. Alcune altre teorie scientifiche ellenistiche

3.1. *L'ottica*

Una delle prime applicazioni della matematica ellenistica fu la creazione di quella teoria che oggi conosciamo come ottica geometrica. Il primo trattato noto sull'argomento è l' *Ottica* (τὰ ὀπτικά) di Euclide.

Occorre innanzitutto chiarire che l' *Ottica* di Euclide si occupa solo della visione diretta, escludendo fenomeni di riflessione (che formavano l'oggetto di un'altra scienza, detta *catottrica* [1]) e di rifrazione. Ciò detto, la nascita dell'ottica illustra bene in cosa consista la novità del metodo scientifico. La legge della propagazione rettilinea della luce era infatti ben nota: è accennata, per esempio, da Platone. [2] Quella di Platone era stata però solo una singola affermazione. Nell' *Ottica* di Euclide si costruisce, invece, ciò che abbiamo chiamato una "teoria scientifica". Nel caso specifico la cosa è particolarmente semplice, giacché dal punto di vista della sua struttura interna la teoria può essere considerata una parte della geometria. Ciò che cambia radicalmente sono quelle che abbiamo chiamato le "regole di corrispondenza". I *raggi visuali* (ὄψεις) all'interno della teoria possono essere considerati proprio come i segmenti degli *Elementi*, ma a essi non si fanno corrispondere più linee tracciate con la riga, bensì percorsi possibili della luce. Sulla base di questa semplice regola, della struttura della geometria già sviluppata e di alcuni postulati sulla relazione tra la geometria dei *raggi visuali* e le percezioni visive si ottiene subito una "teoria scienti-

[1] Sia l' *Ottica* di Euclide sia una *Catottrica* pseudo-euclidea sono pubblicate in [Euclidis OO], vol. VII.

[2] Cfr. Platone, *Parmenide*, 137e, 3-4, dove la propagazione della luce viene implicitamente usata per definire il concetto di rettilineo.

fica". Euclide, infatti, deduce nella sua opera tutta una teoria quantitativa, che permette, tra l'altro, di studiare le ombre o di calcolare le grandezze apparenti degli oggetti, introducendo il concetto di grandezza angolare; per la prima volta si mostrava come anche le apparenze potessero essere oggetto di analisi quantitativa con i metodi della scienza.

La teoria scientifica dell'ottica portò anche all'elaborazione delle leggi della prospettiva. Anche se non ci sono rimasti manuali sull'argomento a uso dei pittori, questa applicazione è già chiara nell' *Ottica* di Euclide (che in larga misura è finalizzata a questo scopo) ed è documentata in Lucrezio,[3] Erone[4] e Vitruvio, che scrive:

> La scenografia, poi, è lo schizzo del fronte e dei lati che si allontanano e la convergenza di tutte le linee al centro del compasso.[5]

L'uso della parola "scenografia" (*scaenographia*) per quella che noi chiamiamo prospettiva mostra come all'origine di questa tecnica vi fossero state le esigenze di realismo delle rappresentazioni teatrali; i rapporti tra prospettiva e scenari teatrali sono del resto confermati dall'analisi delle opere pittoriche. Riguardo a queste ultime, data la perdita totale degli originali, particolare importanza hanno gli affreschi e mosaici di Pompei e di Ercolano, di chiara origine ellenistica, in cui l'applicazione delle regole della prospettiva è evidente.[6] Nonostante Vitruvio la faccia risalire ad Anassagora e Democrito,[7] la relazione tra l'introduzione della prospettiva in pittura e la rivoluzione scientifica, che in particolare aveva portato allo sviluppo dell'ottica,

[3] Lucrezio osserva che un lungo portico ci appare come un cono, verso il cui vertice (oggi detto *punto di fuga*) convergono tetto, pavimento e pareti laterali (*De rerum natura*, IV, 426-431). Lo stesso esempio è riportato da Sesto Empirico (*Adversus Dogmaticos*, I, 244). Molti storici dell'arte hanno tuttavia negato che il concetto di punto di fuga fosse presente nell'antichità classica; cfr., ad esempio, [Gombrich], p.96.

[4] Erone definisce la *scenografia* come quella parte dell'ottica necessaria per disegnare le apparenze degli edifici; cfr. *Definizioni* ([Heronis OO], vol.IV), p. 106.

[5] "Item scaenographia est frontis et laterum abscedentium adumbratio ad circinique centrum omnium linearum responsus" (Vitruvio, *De architectura*, I, ii, 2).

[6] Per un'analisi della pittura ellenistica, e in particolare della prospettiva, cfr., ad esempio, [Bianchi Bandinelli], saggio che contiene anche un'ampia bibliografia sull'argomento.

[7] Vitruvio, *De architectura*, VII, praef., 11. Nello stesso brano Vitruvio parla però di pitture nelle quali la lontananza è resa dall'incertezza dell'immagine; egli inoltre, citando gli autori successivi che, in epoca classica, avevano applicato la geometria alla pittura, non torna sull'argomento della prospettiva, ma accenna all'uso della geometria solo a proposito di simmetrie e proporzioni; si può quindi sospettare che Vitruvio attribuisca ad Anassagora e Democrito sviluppi successivi.

è indicata dalle date. Le prime opere pittoriche documentate in cui sembra che fossero applicate le nuove regole risalgono infatti al regno di Alessandro: si tratta in particolare del quadro di Aezione *Le nozze di Alessandro e Rossane* (del quale conosciamo una descrizione a opera di Luciano[8]) e del quadro di Apelle rappresentante Alessandro che impugna un fulmine nel tempio di Diana. Plinio, sottolineando che in quest'ultimo dipinto il fulmine sembrava uscire dal quadro,[9] sembra riferirsi a uno dei primi tentativi riusciti di rappresentare la terza dimensione. L'affermazione dello stesso Plinio che il grandissimo Apelle (generalmente considerato il massimo pittore dell'Antichità) era stato superato nella capacità di rendere la distanza degli oggetti dal meno famoso Asclepiodoro[10] appare anch'essa fornire un indizio che a quell'epoca (cioè verso la fine del IV secolo[11]) le regole della prospettiva fossero ancora in corso di perfezionamento; si tratta della stessa epoca alla quale risale l'*Ottica* di Euclide. Questa datazione è coerente sia con l'analisi delle altre descrizioni rimasteci di quadri[12] sia con l'assenza di qualsiasi riferimento alla prospettiva in un lungo brano che Platone dedica ai tentativi dei pittori di riprodurre le impressioni visive.[13] Ciononostante l'uso della prospettiva è stato spesso retrodatato alla piena età classica, confondendo l'applicazione di ben determinate regole geometriche con altre tecniche (come l'uso del chiaroscuro, certamente risalente all'età classica) atte a generare l'illusione di profondità spaziale. In passato si tendeva o a negare l'uso della prospettiva nell'Antichità o ad attribuirne l'introduzione ai Romani.

La prospettiva venne dimenticata nel Medio Evo e non fu scoperta indipendentemente in nessuna altra civiltà; essa fu recuperata nell'ambito dell'interesse rinascimentale per la cultura ellenistica.[14]

[8] Luciano, *Erodoto, o Aezione.*

[9] Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 92.

[10] Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 80.

[11] Asclepiodoro lavorò alla corte del tiranno Mnasone, che regnò dal 338 al 297.

[12] Cfr. il saggio già citato di Bianchi-Bandinelli.

[13] Platone, giudicando severamente i tentativi della pittura a chiaroscuro di dipingere le apparenze degli oggetti, ricorda che la grandezza con cui gli oggetti appaiono dipende dalla distanza e afferma che a tali apparenze non spetta alcun valore di verità; si tratta di inganni, mentre le grandezze "vere" sono quelle che, in quanto misurabili, possono essere oggetto di scienza (Platone, *Repubblica*, X, 602c-603a). Sembra, quindi, che non solo le regole della prospettiva ma anche la possibilità di misurare le "grandezze apparenti" e farne una teoria quantitativa fosse ignota a Platone.

[14] L'uso della prospettiva da parte dei pittori ellenistici era ovviamente ben noto ai pittori rinascimentali che la reintrodussero nella pittura. Cfr., per esem-

L' "ottica" (della propagazione rettilinea), anche se è un'applicazione molto semplice della geometria (almeno tale adesso ci appare), ebbe un ruolo importante come ponte tra la geometria e tutte le scienze collegate alla visione.

Innanzitutto, infatti, si trattava di un importante strumento preliminare dell'astronomia. Nell' *Arenario* di Archimede, per esempio, vi è la descrizione di una misura della grandezza apparente del Sole, [15] misura per nulla banale se si vuole una ragionevole precisione. L' "ottica" era poi un ingrediente necessario per la progettazione di tutti gli strumenti visivi, come gli strumenti per il rilevamento topografico o l'astrolabio.

Si è spesso insistito sul fatto che nell' *Ottica* di Euclide è detto che i raggi partono dall'occhio e non dall'oggetto osservato e questa affermazione è sembrata una grave ingenuità. Si tratta invece di un tipico caso di incomprensione moderna del metodo scientifico ellenistico. L'ottica degli scienziati ellenistici era, come indica la parola stessa ὀπτική, una teoria scientifica della visione. Tale teoria, proprio come la geometria esposta negli *Elementi*, era basata su definizioni e teoremi formulati in termini di alcuni enti, quali i "raggi visuali" (ὄψεις). Tali "raggi visuali" nell'opera di Euclide non sono enti fisici più di quanto lo siano i "segmenti" della sua opera più famosa: in entrambi i casi si tratta di enti interni alla teoria, che possono essere usati come modello di oggetti concreti. Per fornire un modello matematico della visione, cioè per sviluppare l'ottica, nel significato originario del termine, occorre evidentemente studiare il cono dei "raggi visuali" con il vertice nell'occhio [16]; la reale origine della luce non è invece presa in considerazione, non essendo "modellata" nella teoria.

Vedremo come gli scienziati ellenistici, oltre a fornirci l'ottica geometrica, ci hanno dato, tra l'altro, la tecnologia dei riflettori e la prima descrizione della retina e dei nervi ottico e oculomotore. È improbabile che fossero convinti che la luce del giorno dipenda dal gran numero di palpebre aperte.

L'attuale distinzione tra matematica e fisica e il significato attuale del titolo del trattato ha fatto dimenticare che Euclide

pio, Piero della Francesca, *De prospectiva pingendi*, opera che inizia sottolineando l'esigenza di recuperare questa antica tecnica ed elencando antichi pittori che l'avevano usata. Ciononostante nei secoli successivi si è negato l'uso della prospettiva nell'Antichità, attribuendone l'introduzione a quegli stessi pittori rinascimentali che avevano chiaramente indicato i loro precedenti.

[15] Archimede, *Arenario*, 137-140 (ed. Mugler).

[16] È chiaro che mentre è irrilevante la scelta di un verso su un singolo raggio visuale, non è affatto equivalente considerare coni di raggi uscenti dall'occhio o dall'oggetto osservato: solo la prima scelta permette di costruire un modello della visione. Questo punto è stato sottolineato per la prima volta da A. Lejeune (cfr. [Lejeune EP] e [Lejeune CG]).

negli *Elementi* e nell' *Ottica* usa esattamente lo stesso metodo (come è facile verificare confrontando i due testi). I fisici dell'età moderna hanno spesso confuso i loro modelli con gli oggetti cui corrispondono, ma si tratta di una confusione che i geometri non hanno mai fatto e che ben difficilmente avrebbe potuto fare l'autore degli *Elementi*.[17] Accusare Euclide di avere trascurato nell' *Ottica* la "vera" origine dei raggi è un'accusa analoga a quella di aver trascurato negli *Elementi* di occuparsi del "vero" spessore dei segmenti. Va detto che il fraintendimento era iniziato già nel periodo imperiale, quando, essendosi perduta l'idea di "teoria scientifica", i "raggi visuali" furono interpretati come oggetti fisici emessi dagli occhi. Questa interpretazione è già presente in una prefazione all'*Ottica* di Euclide[18] (risalente forse al IV secolo d.C.), che è premessa all'opera nei manoscritti che ne riportano l'edizione usualmente attribuita a Teone.[19] Gli scritti di età imperiale sono stati spesso considerati equivalenti ai trattati scientifici del III secolo a.C. e questa confusione tra civiltà diverse ha reso inevitabile l'equivoco. Torneremo su questo punto nel §5.2.

La "catottrica", basata sulla legge della riflessione, serviva a progettare vari tipi di specchi, tra i quali i famosi "specchi ustori", cioè specchi parabolici che potevano concentrare i raggi paralleli del sole in un punto (detto, per questo motivo, "fuoco" della parabola). Una tradizione molto popolare, documentata per la prima volta in Galeno[20] e ripresa da varie fonti bizantine, associa gli specchi ustori ad Archimede, che li avrebbe costruiti durante l'assedio di Siracusa per bruciare le navi romane. Questo uso bellico è poco probabile per vari motivi: per le dimensioni che avrebbero dovuto raggiungere gli specchi, per la loro scarsa efficacia distruttiva e per l'assenza di notizie al riguardo nelle descrizioni dell'assedio di Siracusa lasciateci da Polibio, Livio e Plutarco (tutti autori che scrivono sui congegni bellici apprestati da Archimede). Gli specchi ustori non sono però certamente una leggenda, dato che sia Diocle[21] sia forse Apollonio

[17] Osserviamo che se la confusione tra gli oggetti concreti e i loro modelli matematici non ha riguardato in genere gli enti della geometria, ciò è dovuto in larga misura proprio alla tradizione didattica basata sull'opera di Euclide.

[18] Cfr. [Euclidis OO], vol. VII, p.150, dove si afferma che se gli occhi dovessero ricevere e non emettere qualcosa dovrebbero essere cavi, come sono narici e orecchie.

[19] Tale edizione fu attribuita a Teone da Heiberg, che scoprì anche una diversa stesura dell'opera, da lui ritenuta originale, trasmessa da diversi codici. Ambedue le redazioni sono pubblicate in [Euclidis OO], vol. VII. Le opinioni di Heiberg sono state però recentemente contestate (cfr. [Jones A.]).

[20] Galeno, *De temperamentis*, III, ii.

[21] L'opera di Diocle *Sugli specchi ustori*, del II secolo a.C., è stata trovata in versione araba e edita da Toomer ([Toomer: Diocle]).

di Perga[22] e già, prima di loro, Dositeo[23] alla metà del III secolo a.C. si occuparono di queste applicazioni. Invece di limitarsi a ribadire l'inattendibilità del racconto tradizionale, respingendo implicitamente nel leggendario l'argomento in sé (come in genere si è indotti a fare) sarebbe quindi più interessante indagare sull'uso effettivo di questi strumenti.

La tradizionale associazione degli specchi ustori ad Archimede potrebbe avere un fondamento nelle sue opere. Poiché sappiamo da Diocle che il principale corrispondente alessandrino di Archimede, Dositeo,[24] si era occupato di specchi parabolici, ottenendo solo risultati parziali,[25] il problema si era probabilmente imposto all'attenzione di Archimede. D'altra parte l'esistenza di una *Catottrica* di Archimede è testimoniata da Teone[26]; è plausibile che in quest'opera Archimede (che aveva scritto opere teoriche sulle parabole e i paraboloidi e, come vedremo, aveva applicato anche l'idrostatica al caso dei paraboloidi) non avesse trascurato il caso degli specchi ustori di forma parabolica; anche perché Apuleio, elencando alcuni degli argomenti della *Catottrica* di Archimede, parla appunto di specchi concavi capaci di concentrare i raggi del sole in un punto.[27] Si capisce come, collegando tale scritto di Archimede al ricordo del suo contributo alla difesa di Siracusa (anche con la progettazione di armi da getto in grado di incendiare le navi a distanza) sia potuta nascere la credenza tradizionale.

Il risultato teorico più interessante sulla riflessione è probabilmente un teorema contenuto nella *Catottrica* di Erone,[28] secondo il quale un raggio di luce che, partito da un punto A, giunge in B dopo essersi riflesso su di uno specchio piano, percorre il più breve tra tutti i cammini tra A e B che toccano lo specchio.[29] Va anche notato che già Archimede aveva dedotto

[22] L'opera di Apollonio sugli specchi ustori è citata nel *Fragmentum mathematicum Bobiense*, 113, 28-33 (Hermes, xvi, 1881, 279-280). Toomer, sulla base del confronto tra la citazione e il testo di Diocle, pensa però che l'opera citata sia quella di Diocle, attribuita per errore ad Apollonio dall'autore del frammento ([Toomer: Diocle], p. 16).

[23] Come sappiamo da Diocle ([Toomer: Diocle], p. 34).

[24] Archimede gli indirizzò le opere *Sulla sfera e sul cilindro*, *Sui conoidi e gli sferoidi* e *Sulle spirali*.

[25] Diocle afferma che Dositeo aveva risolto solo "praticamente" (o qualcosa del genere; il testo arabo non è chiaro) il problema di costruire uno specchio che facesse convergere i raggi del Sole in un punto ([Toomer: Diocle], p. 34).

[26] Teone, *Commento al I libro dell'Almagesto*, iii.

[27] Apuleio, *Apologia*, xvi.

[28] *De speculis*, 4. Si crede che quest'opera (pubblicata in [Heronis OO], vol. II, parte i), che ci è pervenuta anonima in latino, sia la traduzione della *Catottrica* di Erone.

[29] La dimostrazione di questo teorema è molto semplice ed è basata sull'osservazione che il cammino percorso dal raggio non cambia se al primo trat-

le leggi della riflessione dal principio di reversibilità del cammino ottico.[30]

L' *Ottica* di Tolomeo è la più antica opera conservata[31] che si occupa in modo sistematico dei fenomeni di rifrazione. Gi studi sulla rifrazione erano stati però ben più antichi; anche la considerazione di Tolomeo che la direzione in cui si trovano i corpi celesti differisce da quella osservata per la rifrazione della luce all'ingresso nell'atmosfera sembra risalire al periodo ellenistico.[32]

Nell' *Ottica* di Tolomeo sono tabulati gli angoli di rifrazione corrispondenti a vari angoli di incidenza per aria-acqua, aria-vetro e acqua-vetro.[33] È un esempio di quel metodo sperimentale che in genere si sostiene essere mancato nell' "Antichità". Sembra che Tolomeo pensasse che la dipendenza dell'angolo di rifrazione dall'angolo di incidenza fosse esprimibile con un polinomio di secondo grado.[34] Nel V libro Tolomeo esamina la rifrazione tra due mezzi separati da una superficie piana o cilindrica. A questo punto il testo si interrompe e il traduttore avverte che il resto dell'opera non è stato trovato. Cosa conteneva la parte mancante del V libro? Si sarebbe tentati di scoprirlo leggendo l'inizio dell'opera, che presumibilmente esponeva contenuto e finalità del trattato, ma purtroppo ci manca anche il I libro.[35] Poiché nei libri III e IV, dedicati alla rifles-

to, da A al punto di incidenza, si sostituisce il suo simmetrico rispetto allo specchio.

[30] La dimostrazione di Archimede è riferita in uno scolio alla *Catottrica* pseudo-euclidea ([Euclidis OO], vol. VII, p. 348, sc. 7).

[31] Ne abbiamo però solo una traduzione in latino (incompleta e spesso oscura) effettuata nel XII secolo da una versione araba. Tale traduzione è stata pubblicata in [Govi: Tolomeo].

[32] Questa considerazione, prima che in Tolomeo, *Ottica*, V, 30, 151 sgg. (ed. Govi), è già in Cleomede, *Caelestia* (ed. Todd), II, 6, 174-177. L'opera di Cleomede è una compilazione risalente alla metà del I secolo d.C.; è molto improbabile che vi siano riportati risultati scientifici posteriori al periodo ellenistico. Su questo argomento cfr. anche Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, V, 82. Altri accenni alla rifrazione sono in diversi autori del primo periodo imperiale, ad esempio in Seneca, *Naturales quaestiones*, I, vi, 5.

[33] Tolomeo, *Ottica*, V, 144-150 (ed. Govi).

[34] Tolomeo non scrive esplicitamente la dipendenza funzionale, ma i valori da lui forniti presentano differenze seconde costanti. Tali valori rappresentano con notevole accuratezza i dati reali per angoli di incidenza compresi tra 50° e 70° e se ne discostano di molto quando l'angolo di incidenza è di 80°. I valori sono evidentemente ottenuti con il concorso di due operazioni: un'accurata indagine sperimentale e una successiva estrapolazione (o "correzione") dei dati basata sulla convinzione "a priori" che le differenze seconde dovessero essere costanti. Le due operazioni implicano un atteggiamento così diverso verso i dati sperimentali che è plausibile attribuirle a persone distinte e forse non contemporanee.

[35] Mentre sembra che Ibn al-Haytham conoscesse l'*Ottica* di Tolomeo nella stessa forma mutila che ci è rimasta (cfr. [Lejeune CG]), Ruggero Bacone

sione, si erano considerati prima specchi concavi e convessi e poi l'effetto della riflessione su due o più specchi in successione, si può supporre che l'argomento della rifrazione fosse esposto seguendo un ordine analogo.

L' *Ottica* di Tolomeo è l'unica opera rimastaci in cui è esposta sia una teoria della visione binoculare sia uno studio sperimentale sulla visione dei colori.[36]

Poiché quasi tutti i trattati ellenistici di ottica (tra i quali vi erano opere di Archimede, Apollonio di Perga e Ipparco[37]) si sono perduti, siamo male informati su molti argomenti: per esempio sulla storia delle ricerche effettuate sulla dispersione della luce[38]; l'interesse per questo argomento è comunque dimostrato dai molti accenni che si trovano in letteratura, tra gli altri in Diogene Laerzio,[39] Plutarco,[40] Lucrezio[41] e Seneca[42]; secondo la testimonianza di Apuleio del fenomeno dell'arcobaleno si era occupato anche Archimede.[43]

nell' *Opus Majus* ne cita ancora il I libro (come osservato in [Govi: Tolomeo], p. xvi). Si può sospettare quindi che oltre alla traduzione araba monca che è all'origine dell'attuale testo latino si fosse conservato anche un testo completo.

[36] Sono particolarmente interessanti le pagine sui dischi ruotanti con settori di vari colori (che saranno detti *dischi di Newton*). Cfr. Tolomeo, *Ottica*, II (ed. Govi), 40-41.

[37] Accenni a una teoria ottica di Ipparco sono in Plutarco, *De facie...*, 4, 921D-E; Plutarco accenna anche a una teoria della visione binoculare (*Quaest. conviv. libri vi*, 625E-626E) che è attribuita a Ipparco nel *De placitis philosophorum* pseudo-plutarcheo (901B). La teoria della visione binoculare esposta da Tolomeo nell' *Ottica* è tuttavia considerata in genere il primo scritto su questo argomento. Vedremo come Ipparco avesse anche contribuito al perfezionamento di strumenti ottici (cfr. più avanti, p. 146, n.123).

[38] Cioè sulla dipendenza dell'angolo di rifrazione dal colore della luce (dipendenza che causa il fenomeno dell'arcobaleno e permette l'analisi spettrale della luce con un prisma).

[39] Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VII, 152.

[40] Cfr., per esempio, *De facie quae in orbe lunae apparet*, 921A; *De Iside et Osiride*, 358F-359A.

[41] *De rerum natura*, II, 799-800.

[42] Seneca (*Naturales quaestiones*, I, vii, 1) accenna a oggetti di vetro "con molti angoli", attraverso i quali la luce del sole veniva scomposta nei colori dell'iride. Seneca parla di una *virgula* vitrea; tale termine è di solito tradotto *bastoncino*; *virga*, però, oltre a significare *bastone*, è anche il nome del fenomeno, simile all'arcobaleno ma non arcuato (detto ancora *verga*), del quale Seneca si occupa subito dopo il passo citato. La *virgula* vitrea potrebbe essere stata quindi, nella fonte di Seneca, un "piccolo arcobaleno dritto" ottenuto con un oggetto di vetro. Quanto ai "molti angoli", è possibile che la fonte di Seneca non si riferisse a oggetti di forma particolarmente spigolosa, ma agli angoli di rifrazione dei vari colori.

[43] Apuleio, *Apologia*, xvi.

3.2. *Il rilevamento, la topografia e la geodesia*

Erodoto attribuisce agli Egizi l'introduzione della *geometria* (cioè della *misurazione della terra*), individuandone l'origine nell'esigenza di misurare, a fini fiscali, le variazioni nell'estensione delle proprietà dovute all'erosione del Nilo.[44] Questa applicazione antichissima della "matematica" deve aver generato, all'inizio dell'epoca ellenistica, il rilevamento e la topografia scientifiche. Si tratta di argomenti sui quali non esiste una sufficiente documentazione diretta. Che queste applicazioni abbiano avuto un ruolo non trascurabile nello sviluppo iniziale della scienza e della tecnologia sembra comunque probabile in base alle considerazioni seguenti.

La realizzazione delle strutture urbane di molte città ellenistiche, basate, come nel caso di Alessandria, su un piano regolatore dettagliato, deve avere certo stimolato lo sviluppo di un metodo efficiente di triangolazione, che a sua volta richiede e induce lo sviluppo teorico della trigonometria, che pertanto fu probabilmente contemporaneo a quello della topografia scientifica. Il primo uso documentato di metodi trigonometrici risale all'opera astronomica rimastaci di Aristarco di Samo, della prima metà del III secolo a.C.[45] I metodi usati da Aristarco per calcolare le distanze del Sole e della Luna appaiono chiaramente ardite estensioni su scala astronomica dei metodi di triangolazione topografica.

Gli strumenti per il rilevamento di cui parla Vitruvio[46] sono di origine greca, come mostra anche il loro nome, ma non sono documentati nella Grecia classica. Il perfezionamento di tali strumenti, che giungeranno al livello raffinato della diottra descritta da Erone (di cui riparleremo), fu basato sull'uso combinato della tecnologia meccanica, dell'ottica e dell'idrostatica. D'altra parte lo sviluppo di tali strumenti deve essere stato tra le prime motivazioni della nascita dell'ottica geometrica, che, come abbiamo visto, risale al primo ellenismo.

Dalla topografia si aprirono molte direzioni di sviluppo, che furono intraprese sin dal III secolo a.C.: non solo si passò alla cartografia e alla geografia matematica, ma alcuni strumenti

[44] Erodoto, *Le Storie*, II, 109.

[45] Aristarco di Samo, *Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*. Aristarco usa metodi trigonometrici nel senso che calcola i rapporti tra i lati di un triangolo del quale sono noti gli angoli. Egli naturalmente non può calcolare i valori esatti, né può usare tavole di valori approssimati di funzioni trigonometriche (non esistenti ai suoi tempi), ma determina piccoli intervalli nei quali può dimostrare che sono compresi i rapporti che lo interessano. L'opera di Aristarco è pubblicata in appendice in [Heath Aristarchus].

[46] Vitruvio, *De architectura*, VIII, v, 2-3.

(sia tecnici sia teorici) per il rilevamento topografico furono utilizzati anche per le osservazioni astronomiche. Lo sviluppo dell'astronomia permise d'altra parte di affrontare anche il problema del rilevamento della posizione in mare.

Il maggior risultato della matematica applicata ellenistica nella direzione della geodesia fu la misura del meridiano terrestre a opera di Eratostene.[47] Per la prima volta, grazie alla scienza, l'umanità seppe le dimensioni del proprio mondo e le seppe con accuratezza e certezza. Le valutazioni precedenti (riportate da Aristotele senza accennare al metodo usato[48]) erano appunto "valutazioni" e non "misure". L'ammirazione per il risultato fu così generale che secoli dopo Plinio ne avvertiva ancora l'eco.[49]

Il metodo usato da Eratostene, come è descritto da Cleomede (e come è riportato anche in molti manuali scolastici e libri divulgativi), è il seguente.

Si sapeva che Siene (l'odierna Assuan) era quasi sul tropico: il Sole vi era infatti circa allo zenit a mezzogiorno del solstizio d'estate. L'angolo (misurato con una meridiana) che nello stesso momento i raggi del sole formavano con la verticale di Alessandria poteva quindi fornire l'angolo tra le verticali delle due città. Conoscendo anche la distanza lineare tra Alessandria e Siene se ne poteva dedurre la distanza corrispondente a un grado di cerchio massimo. La difficoltà di sapere ad Alessandria il momento in cui era mezzogiorno a Siene era superata dall'assunzione che Siene fosse esattamente a sud di Alessandria e che quindi nelle due città il mezzogiorno fosse contemporaneo.

Torneremo sui dettagli tecnici nel §9.2. Ora ci interessa la metodologia generale, che esemplifica bene il "metodo scientifico" che abbiamo già cercato di descrivere più volte. Eratostene infatti dovette:

a) assumere un modello teorico, basato sulla geometria, l'ottica e le assunzioni della sfericità della Terra e della piccolezza del raggio terrestre rispetto alla distanza Terra-Sole;

b) usare allo stesso tempo una misura astronomica, un'osservazione fatta a centinaia di chilometri di distanza, la valutazione empirica della distanza tra due città e l'assunzione, anch'essa su base empirica, che Siene fosse direttamente a sud di Alessandria;

[47] Tale misura fu descritta da Eratostene nella sua opera *Sulla misurazione della Terra*, che non ci è giunta; siamo informati sul metodo usato soprattutto da Cleomede, *Caelestia*, I, 7, 48-110, (ed. Todd). Torneremo sul resoconto di Cleomede nel §9.2.

[48] Aristotele, *De caelo*, II, 14, 298a. Probabilmente le valutazioni erano basate sul confronto tra le altezze sull'orizzonte di alcune stelle in paesi diversi.

[49] Cfr. Plinio, *Naturalis historia*, II, 247-248.

c) introdurre i dati precedenti, con le "regole di corrispondenza", nel modello;

d) elaborare i dati con i metodi della geometria;

e) ritrasferire i risultati nel mondo reale, usando nuovamente le "regole di corrispondenza".

Era un chiaro esempio della potenza del metodo scientifico, giacché gli oggetti concreti ottenuti con il passo e) appartenevano anche alla parte ignota della Terra, che nessun uomo dell'Antichità avrebbe mai visto.

Oggi siamo abituati sin da bambini a usare almeno alcuni elementi di quella "teoria scientifica" (la geografia matematica) che dalla misura di Eratostene ebbe origine. Ciò ci permette, in questo caso, di passare dal mondo alla teoria e viceversa con rapidità e facilità, compensate però in genere da una scarsa consapevolezza del metodo usato. Per questo motivo il metodo appena esposto rischia di sembrare a molti banale, mentre in realtà esso è del tutto inaccessibile alle civiltà prescientifiche, cui manca la dimensione concettuale del "modello teorico"; non a caso nessuna altra civiltà era stata in grado di fare altrettanto e in tutta l'antichità nessuno scrittore latino è mai riuscito a riferire in modo ragionevole il procedimento di Eratostene.

Chi pensa che il metodo di Eratostene, pur essendo certo ammirevole per gli "Antichi", sia elementare per noi "moderni" dovrebbe forse riflettere sul fatto che le misure "moderne" della Terra si basarono su circa due secoli di studio delle opere ellenistiche sull'argomento.

3.3. *La geografia matematica e la cartografia*

La misura del diametro della Terra non fu un risultato isolato. Essa, se da una parte era il coronamento della "geometria", nel senso etimologico che l'aveva inizialmente motivata, dall'altra era un passaggio essenziale verso la realizzazione di un ambizioso progetto scientifico: la descrizione quantitativa di tutto il mondo conosciuto.

Si trattava di una esigenza particolarmente sentita in seguito all'improvvso estendersi del mondo greco dovuto alle conquiste di Alessandro. Già l'allievo di Aristotele Dicearco, verso il 300 a.C., aveva fatto il primo passo verso la costruzione della geografia matematica individuando un parallelo, elencando cioè una successione di località poste tutte alla stessa latitudine, da Gibilterra alla Persia.[50]

[50] L'attribuzione a Dicearco dell'introduzione del primo parallelo è basata su Dicearco, fr. 110 (ed. Wehrli).

Eratostene, sulla base del lavoro di Dicearco, della propria misura del meridiano e della raccolta sistematica di altre informazioni, disegnò la prima carta scientifica del mondo conosciuto, che si estendeva da Gibilterra all'India e dalla Somalia al circolo polare artico. Nel II secolo a.C. la geografia matematica progredì anche a opera di Ipparco di Nicea, che in particolare aveva insistito sulla necessità di determinare le differenze di longitudine con metodi astronomici, misurando la differenza tra i tempi locali della stessa eclissi lunare. [51]

In epoca imperiale, nel II secolo d.C., si occuparono di nuovo di geografia, in stretta connessione con l'astronomia e la geometria sferica, Marino di Tiro e Tolomeo, la cui principale opera sull'argomento, la *Geografia*, ci è rimasta (anche se in un incompleto rifacimento bizantino).

La differenza tra la geografia matematica ellenistica e le opere "geografiche" della Grecia classica, di Roma e del Medio Evo (che sono essenzialmente resoconti di viaggi) illustra bene la differenza tra civiltà scientifiche e prescientifiche.

La geografia matematica di Tolomeo è altrettanto scientifica di quella moderna. [52] Si tratta di una tipica "teoria scientifica", in cui a ogni luogo della Terra corrisponde, nel modello, un punto di una superficie sferica, individuato da una coppia di coordinate sferiche: latitudine e longitudine. Con questa teoria scientifica si possono risolvere vari problemi: si possono, per esempio, calcolare le durate del giorno in dipendenza della data e della latitudine e spiegare i climi su questa base. Tolomeo conosce anche la cartografia, sa usare cioè varie proiezioni, tra le quali proiezioni coniche modificate, di cui usa le proprietà matematiche, per rappresentare la Terra su carte piane in modo da conservare tutta l'informazione relativa alla rappresentazione su una superficie sferica.

È possibile ricostruire le carte di Tolomeo in base alle latitudini e longitudini da lui annotate nella *Geografia* per circa 8.000 località, dall'Irlanda al Sud-est asiatico.

Mentre Eratostene aveva determinato, con buona approssimazione, in 700 stadi la lunghezza di un grado di meridiano e la stessa misura era stata accettata, un secolo dopo, da Ipparco, [53] Marino e Tolomeo usarono il valore di 500 stadi. [54] Fu que-

[51] Cfr. Strabone, *Geografia*, I, i, 12. Strabone, evidentemente per una svista, parla anche di eclissi solari. La svista si è propagata a lungo (cfr., per esempio, la voce *Hipparchus* nell'ultima edizione dell'*Enciclopædia Britannica*).

[52] Infatti la geografia matematica "moderna" non è altro che quella di Tolomeo, recuperata dagli studiosi rinascimentali.

[53] Cfr. Strabone, *Geografia*, II, v, 7.

[54] Sembra che la differenza tra le due misure non sia dovuta all'uso di sta-

sto errore a portare Colombo, le cui conoscenze geografiche erano basate sulla *Geografia* di Tolomeo, a sottovalutare notevolmente le dimensioni della Terra.[55] Anche se l'origine di questo "rimpicciolimento del mondo" avvenuto in età imperiale non è chiara, l'errore è così grossolano che non può derivare da una nuova misura indipendente, ma solo da una errata interpretazione dei dati antichi. Evidentemente sia Marino sia Tolomeo cercano di usare i risultati del periodo aureo, ma non sempre vi riescono, giacché ne sono separati da secoli attraverso i quali non vi era stata continuità nella trasmissione delle informazioni.[56] Ci si può chiedere come mai Marino di Tiro e Tolomeo, pur conoscendo il metodo usato da Eratostene e potendo quindi usare di nuovo la stessa informazione su Siene, non abbiano tentato di ripetere la semplice misura dell'inclinazione dei raggi solari. Torneremo su questo problema nel §9.2.

3.4. *La meccanica*

Abbiamo già accennato nel §1.5 alle caratteristiche principali della meccanica aristotelica. Nel primo trattato ellenistico sull'argomento a noi pervenuto, *Sull'equilibrio delle figure piane*, di Archimede, la *meccanica* (cioè la *scienza delle macchine*) ha invece l'assetto caratteristico di quelle che abbiamo chiamato "teorie scientifiche". Nell'opera di Archimede sono affrontati due problemi strettamente connessi: la legge della leva e la ricerca di baricentri di figure piane. Mach criticò Archimede,

di di diversa lunghezza, ma che Tolomeo attribuisse effettivamente una minore lunghezza al meridiano (cfr. [Neugebauer, HAMA], pp. 653-654). Che già Marino avesse adottato il valore di 500 stadi è riferito in Tolomeo, *Geografia*, I, xi.

[55] Osserviamo che l'errore (che riguardava le dimensioni della Terra e non l'estensione dei continenti noti, che era riportata con approssimazione ragionevole da Tolomeo) influenzò due volte i conti di Colombo. Egli, sopravvalutando l'estensione in longitudine dell'Eurasia, sottovalutò i gradi di longitudine che separavano, verso ovest, la penisola iberica dall'Asia; inoltre sottovalutò la distanza lineare corrispondente alla differenza di longitudine così determinata. Il risultato fu quello di stimare la distanza da percorrere circa la metà di quella reale.

[56] Gli studi ad Alessandria erano stati tragicamente interrotti dalle persecuzioni di Evergete II nel 145 a.C. (cfr. sopra, p. 28). Fu conservata la Biblioteca, che costituì il principale elemento di continuità tra il periodo aureo e la ripresa avvenuta in età imperiale. Dopo la persecuzione la penuria di intellettuali fu però tale che a capo della Biblioteca fu posto un certo Cida ἐκ τῶν λογχοφόρων, cioè un ufficiale dei lancieri, come sappiamo da un papiro (P. Oxy. 1241, II, 16). Si capisce facilmente come questa situazione avesse creato in epoca imperiale quella dipendenza passiva dai testi scritti che sarà ancora più grave in seguito e che a volte viene retrodatata al periodo aureo della scienza alessandrina, confondendo due climi culturali profondamente diversi.

che gli sembrò voler dedurre la legge della leva da insufficienti considerazioni di simmetria, ma non aveva compreso la funzione dei postulati archimedei.[57]

L'interesse di Archimede per la teoria della leva era chiaramente finalizzato allo studio delle macchine e in particolare al calcolo del loro vantaggio meccanico. Purtroppo è rimasto molto poco degli scritti teorici dell'epoca sull'argomento e in particolare si sono persi gli altri trattati di Archimede.[58] Possiamo però ricostruire alcune caratteristiche della meccanica del III secolo a.C. integrando la lettura del trattato archimedeo sopravvissuto con le notizie sulle macchine realizzate (particolarmente importanti sono, a questo riguardo, le testimonianze fornite dalle opere di tecnologia militare) e la lettura di trattati posteriori di secoli: soprattutto la *Collezione* di Pappo e le opere di Erone, tra le quali è particolarmente utile la *Meccanica*,[59] nella quale sono descritte sia le cinque "macchine semplici" (argano, leva, puleggia, cuneo e vite) sia diverse macchine composte adatte a vari usi. Rinviando al capitolo nono alcune considerazioni sugli sviluppi teorici successivi, occupiamoci per ora del problema dal quale era nata la *scienza delle macchine*.

Il principale problema meccanico dell'epoca può essere descritto nel modo seguente. Supponiamo di voler sollevare un peso P a un'altezza h. Invece di farlo direttamente, si può usare una "macchina" che sollevi il peso quando si agisca su di essa con una forza F, spostandone il punto di applicazione (nella direzione di F) di un tratto l. Usando il linguaggio moderno, il principio di conservazione dell'energia implica che il peso non può essere sollevato se il prodotto Fl (oggi detto "lavoro" compiuto dalla forza F) non supera il prodotto Ph; se invece è Fl>Ph (e l'attrito sufficientemente piccolo) non solo il peso può essere sollevato, ma, usando opportuni dispositivi, si possono scegliere sia la direzione, il verso e il luogo in cui far agire la forza, sia la scomposizione del lavoro tra i due fattori, scegliendo in particolare se far agire una forza piccola per un lungo

[57] [Mach], pp. 43-47. Mach usa solo i primi due postulati di Archimede, mentre nella deduzione di Archimede della legge della leva un ruolo essenziale è svolto dal sesto postulato, sul quale hanno attirato l'attenzione O.Toeplitz, W. Stein ed E.J. Dijksterhuis, che ha chiarito come l'analisi di Archimede fosse stata ben più sottile di quella di Mach. Anche intelletti del livello di Mach sono caduti nella trappola di presumere che il tempo trascorso consenta una automatica facile superiorità sugli scienziati ellenistici.

[58] Lo scritto rimastoci è con ogni probabilità estratto da un'opera più vasta, *Elementi di meccanica* (Στοιχεῖα τῶν μηχανικῶν), che Archimede stesso cita con questo titolo (*Sui galleggianti*, 25; ed. Mugler).

[59] Quest'opera fu trovata in traduzione araba da Carra de Vaux e pubblicata in [Carra de Vaux: Erone, Mecc.].

tratto oppure una forza grande per un tratto breve. In particolare si può sollevare il peso P usando una forza F minore di P. Il rapporto P/F viene detto "vantaggio meccanico" della macchina considerata.

Il problema, se si ha a disposizione una forza massima F e occorre sollevare un peso P, è quello di progettare una "macchina" che, avendo un vantaggio meccanico opportuno, permetta il sollevamento e consenta di applicare la forza nella posizione e direzione più comode. Tutti i dispositivi di questo tipo sono in ultima analisi riconducibili al più semplice di essi, la leva, dalla quale parte Archimede nella sua costruzione della "teoria scientifica" della meccanica.

Naturalmente gli uomini avevano sempre avuto problemi di questo tipo e molti ne erano riusciti a risolvere sin dal paleolitico (epoca in cui si erano usati leve e cunei). All'epoca degli antichi imperi erano note anche le tenaglie e senza l'uso di molte "macchine" non sarebbe stato possibile costruire le piramidi. I Greci dell'età classica conoscevano certamente la puleggia e il verricello (il cui uso era stato introdotto probabilmente nella costruzione delle navi o nel teatro). Questa lunghissima evoluzione della "meccanica empirica" era basata sul lento accumulo dell'esperienza degli artigiani. Il salto di qualità permesso dalla scienza, che si ha in epoca ellenistica, consiste nel fatto che si impara a calcolare teoricamente il "vantaggio meccanico" e si ha quindi, per la prima volta, una "progettazione teorica" di macchine. È certo che tale salto di qualità avvenne già nel III secolo a.C. Sappiamo infatti da Pappo[60] e da Plutarco[61] che Archimede aveva risolto il problema di sollevare un dato peso con una forza assegnata; egli sapeva cioè progettare macchine con vantaggio meccanico dato. Non vi è motivo di dubitare di queste fonti, giacché le basi teoriche di questi calcoli sono esposte da Archimede nell'opera che ci è rimasta e varie applicazioni dei suoi progetti sono state tramandate da diversi autori. Sappiamo inoltre che in quell'epoca, forse grazie ad Archimede stesso, fu introdotto per la prima volta l'elemento tecnologico che ancora oggi usiamo per risolvere problemi dello stesso tipo: la ruota dentata.[62]

Nella scienza ellenistica la meccanica è strettamente connessa alla geometria. Diogene Laerzio afferma che Archita (nella prima metà del IV secolo a.C.) non solo aveva introdotto per primo elementi di meccanica nello studio della geometria (usando figure in moto nella costruzione dei due medi proporzionali tra

[60] Pappo, *Collezione*, VIII, 1068, 20 (ed.Hultsch).
[61] Plutarco, *Vita di Marcello*, xiv, 7.
[62] Cfr. il prossimo §4.1.

due grandezze), ma aveva anche per primo trattato questioni di meccanica servendosi di principi matematici.[63]

Lo stretto legame tra geometria e meccanica, intese come due teorie scientifiche, è chiaro ed estremamente fecondo in Archimede. Innanzitutto Archimede, nel trattato *Sull'equilibrio delle figure piane*, in cui fonda lo studio delle macchine semplici, trae dalla geometria non solo la forma generale dello schema deduttivo, ma anche molti risultati tecnici particolari. Inoltre, cosa per noi ben più sorprendente, Archimede usa le leggi della meccanica per scoprire teoremi di geometria. Nell'opera *Sulla quadratura della parabola* la dimostrazione rigorosa che abbiamo esposto nel §2.7 è preceduta da una discussione euristica basata sul principio della leva. Analogamente il volume della sfera è trovato immaginando di dover equilibrare un oggetto sferico e uno cilindrico posti su piatti opposti di una bilancia. Questo procedimento è esposto sistematicamente nel trattato *Sul metodo*, in cui Archimede espone i due metodi diversi da lui usati rispettivamente per scoprire risultati matematici e per darne dimostrazioni rigorose. Il metodo geometrico è usato solo in un secondo momento, per dimostrare proposizioni già individuate come plausibili. Per l'individuazione euristica delle proposizioni egli usa invece il metodo "meccanico", che giudica più intuitivo. L'esposizione di Archimede è di grande interesse per diverse ragioni: per l'estrema onestà intellettuale di chi si sforza di far comprendere non solo la dimostrazione dei propri risultati, ma anche il procedimento mentale con cui sono stati individuati; per l'importanza rivestita per Archimede da ciò che possiamo chiamare "intuizione fisica"; perché mostra quanto sia essenziale per ottenere risultati scientifici nuovi, anche per un "genio" quale Archimede, l'uso di metodi con i quali si ha familiarità (anche se successivamente possono apparire "oggettivamente" lontani dal problema affrontato).

Molte idee diffuse sui rapporti tra "matematica" e "fisica" dovrebbero forse essere riviste in base alla constatazione che la dimostrazione della familiare formula per il volume della sfera, per il metodo con cui fu ottenuta, può essere annoverata tra i primi risultati della "meccanica".

3.5. *L'idrostatica*

Per quanto ne sappiamo, l'idrostatica nasce con l'opera di Archimede *Sui galleggianti*. E nasce già press'a poco nella forma

[63] Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VIII, 83. La costruzione di Archita dei due medi proporzionali è riportata da Eutocio nel suo commento al trat-

definitiva che ha conservato fino a oggi. Archimede infatti ne fa una "teoria scientifica" individuandone il fondamento nel seguente postulato:

> Porzioni di liquido tra loro contigue e allo stesso livello non sono in equilibrio se sono compresse in misura diversa [...] e ciascuna porzione è compressa dal peso del liquido che è sopra di sé in verticale, purché il liquido non sia rinchiuso in qualcosa o compresso da qualcos'altro.[64]

Il cosiddetto "principio dei vasi comunicanti", anche se non è dedotto esplicitamente da Archimede nell'opera rimastaci (dedicata ad altro tema), non solo è chiaramente implicato da questo postulato, ma sembra che possa anche averne suggerito la formulazione.[65]

Dal postulato citato viene dedotto in particolare, come teorema, la famosa proposizione che abbiamo imparato a memoria a scuola con il nome di "principio di Archimede". L'idrostatica di Archimede non si esaurisce però affatto in quell'enunciato, come l'insegnamento scolastico in genere suggerisce. I problemi tipici che Archimede risolve nel suo trattato consistono nel trovare le linee di galleggiamento di solidi in equilibrio immersi in un liquido omogeneo e, soprattutto, nello studiare la stabilità delle loro posizioni di equilibrio. A questo proposito il risultato più interessante riguarda i segmenti retti di paraboloidi di rotazione e può essere enunciato affermando che, per opportuni va-

tato di Archimede *Sulla sfera e sul cilindro*, pp. 62-64 (in [Mugler: Archimède], tome IV). Platone rimproverò Archita per aver contaminato la geometria con la meccanica (Plutarco, *Quaest. conviv. libri iii*, VIII, ii, 1, 718E-F).

[64] Archimede, *Sui galleggianti*, I, 6 (ed. Mugler).

[65] Se infatti due vasi comunicano attraverso un tubo orizzontale e sono in equilibrio, l'eguaglianza di pressione tra le parti di liquido poste allo stesso livello (che, per proprietà transitiva, riguarda anche porzioni di liquido non contigue, poste sia nei vasi sia nel tubo) nel caso dei vasi, dove il liquido non è *rinchiuso da qualcosa*, come dice Archimede, si traduce in un'eguaglianza di altezza della colonna sovrastante. Se il tubo non contiene un segmento orizzontale, la deduzione del *principio dei vasi comunicanti* è leggermente più complessa ma può essere ottenuta per esercizio da chiunque abbia letto con attenzione le prime proposizioni del II libro dell'opera di Archimede. La parte finale dell'enunciato non è stata in genere compresa, anche perché Archimede nel trattato rimastoci, dedicato a corpi galleggianti in un liquido a pelo libero, non ne ha mai bisogno. Il principio dei vasi comunicanti è in genere considerato una scoperta di Erone (che lo usa nella *Pneumatica* e nella *Dioptra*). La conoscenza empirica del fenomeno era comunque certamente più antica di Archimede; Platone cita l'osservazione che se si immergono gli estremi di un filo di lana in due coppe (implicitamente supposte eguali e poste sullo stesso tavolo), l'acqua passa, lungo il filo, dalla coppa più piena a quella meno piena (Platone, *Simposio*, 175D, 6-7).

lori dei parametri geometrici,[66] quando la densità del paraboloide scende al di sotto di un "valore di soglia" (calcolato da Archimede) la posizione d'equilibrio verticale da stabile diviene instabile, mentre divengono stabili tutte le posizioni nelle quali l'asse di simmetria del segmento di paraboloide forma con la verticale un angolo determinato, dipendente dalla densità. Il problema risolto da Archimede costituisce oggi un'applicazione della cosiddetta "teoria delle biforcazioni". Dijksterhuis afferma che questi risultati sono "decisamente al di là del confine della matematica classica".[67] La "matematica classica" è stata evidentemente confinata in un ambito che non contiene neppure le poche opere superstiti del suo più famoso esponente.

La consapevolezza, da parte degli scienziati ellenistici, della natura di "modello teorico" delle teorie scientifiche è chiara nel caso dell'idrostatica archimedea. Nell'opera *Sui galleggianti*, infatti, non si costruisce un solo modello ma due. Nel primo libro dell'opera si dimostra, sulla base del postulato già citato, la sfericità della superficie degli oceani, mentre nel secondo libro tale superficie è assunta piana.[68] Si tratta, evidentemente, di due diversi modelli, utili per descrivere fenomeni che avvengono su scale diverse.

La funzione dell'idrostatica è chiara. All'interno della teoria si tratta di eleganti (e difficili) problemi matematici. Se pensiamo invece agli oggetti reali di cui la teoria fornisce il modello, quali saranno mai questi oggetti concreti dei quali si è interessati a calcolare teoricamente le linee di galleggiamento e la stabilità delle posizioni di equilibrio, prima di porli in un liquido omogeneo? Evidentemente si tratta di problemi di ingegneria navale. Archimede non solo li risolve, ma dà anche alla sua trattazione una elegante ed efficiente struttura assiomatico-deduttiva, che permette di trasformare altri problemi, analoghi a quelli trattati, in "esercizi" interni alla teoria (magari risolubili solo in modo approssimato), permettendo così, in particolare, la progettazione teorica di navi. In ciò consiste il metodo scientifico. Se però i principi vengono avulsi dal contesto e privati della loro funzione, che è quella di essere i punti di partenza di catene deduttive che portano alla soluzione quantitativa di "esercizi" applicabili a problemi concreti, allora si possono ripetere anche gli

[66] Cioè quando l'altezza del segmento di paraboloide supera i 3/2 del "parametro" della parabola. Nel caso contrario Archimede dimostra che l'equilibrio verticale è sempre stabile.

[67] [Dijksterhuis Archimede], p. 305.

[68] La superficie è assunta piana nelle ipotesi iniziali e Archimede non spende una parola per giustificare questa assunzione come approssimazione della "vera" forma sferica.

enunciati di Archimede senza capire nulla della scienza (e rischiando perfino di credere alla favoletta della corona di Gerone). Importanti precedenti dell'idrostatica archimedea sono in Democrito e in Stratone di Lampsaco[69] mentre molto più lontane erano state, al riguardo, le idee di Aristotele.[70]

3.6. *La pneumatica*

Anche nel caso della pneumatica, come in tanti altri, un importante precedente qualitativo della scienza ellenistica è nel pensiero dei presocratici: dobbiamo infatti a Empedocle il primo chiaro riferimento al concetto di pressione atmosferica.[71]

Le prime testimonianze certe sulla pneumatica, intesa come scienza dei fluidi comprimibili, risalgono però alla prima metà del III secolo a.C., quando Ctesibio di Alessandria scrisse almeno due opere su questo argomento: una, presumibilmente di carattere più teorico, intitolata *Dimostrazioni pneumatiche* (Πνεὺματικὰ θεωρήματα)[72] e una di carattere applicativo, gli Ὑπομνήματα (*Commentari*),[73] nei quali erano descritte una grande quantità di macchine. Il contributo di Stratone di Lampsaco alla nascita della pneumatica fu probabilmente anche importante, ma è più difficilmente documentabile.

Purtroppo nessuna delle opere non solo di Stratone ma neppure di Ctesibio si è conservata. La nostra conoscenza di questa antica scienza, oltre che su alcune testimonianze indirette,[74] è basata essenzialmente sulla *Pneumatica* di Filone di Bisanzio, continuatore del lavoro di Ctesibio, e l'opera omonima molto più tarda (del I secolo d.C.) di Erone. Con il nome dell'opera di Filone ci è rimasto un testo arabo, contenente 65 capitoli

[69] Democrito aveva affermato che il moto verso l'alto dei corpi detti "leggeri" è dovuto al fatto che essi, pur essendo pesanti, sono spinti verso l'alto dagli atomi del fluido in cui sono immersi, se questi ultimi sono più pesanti. Cfr. Simplicio, *In Aristot. de caelo* [CAG], vol. VII, 569, 5-9. (= test. 61 [Diels]). Idee simili sono attribuite a Stratone di Lampsaco, che aveva scritto un'opera sul vuoto; cfr. Simplicio, *In Aristot. de caelo* [CAG], vol. VII, 267, 30-268, 4; Stobeo, *Eclogae*, I, xiv, 1h; [Rodier], p. 57; [Diels Stratone], pp.110-119.

[70] Secondo Aristotele (*Physica*, IV, 1; *De caelo*, I, 3; *De caelo*, IV) la leggerezza è una qualità opposta al peso; i corpi dotati di leggerezza tendono naturalmente verso l'alto.

[71] Empedocle, *Poema fisico*, fr. 96 (Gallavotti) = fr. 100 [Diels].

[72] L'opera è citata in Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 77, 12 ([Marsden TT], p. 152). La parola θεωρήματα in questo caso può significare sia "teoremi" sia, più probabilmente, "dimostrazioni" nel senso di "esperimenti dimostrativi".

[73] Cfr. Vitruvio, *De architectura*, X, vii, 4.

[74] Sul lavoro di Ctesibio, oltre alle testimonianze di Filone ed Erone, sono particolarmente importanti quelle di Vitruvio e di Ateneo.

che descrivono altrettanti apparecchi, e vari manoscritti latini.[75] Il testo latino corrisponde, anche se con notevoli tagli, ai primi 21 capitoli del testo arabo; sembra ragionevole farne risalire il contenuto a Filone, anche se i testi che abbiamo sono certamente molto corrotti. Quanto ai capitoli presenti solo nel testo arabo, il loro contenuto è molto diseguale, sia per il livello tecnico sia per la finalità degli apparecchi descritti: è chiaro che si tratta in realtà di una compilazione basata su fonti eterogenee[76]; mentre molte delle applicazioni descritte (come nell'opera omonima di Erone) sono di carattere ludico, l'ultima parte dell'opera è dedicata a ruote idrauliche e macchine per il sollevamento dell'acqua: applicazioni di grande importanza economica che, come vedremo, si erano sviluppate già nel primo ellenismo.[77]

Anche se la perdita totale delle opere di Ctesibio e la corruzione del testo di Filone menomano gravemente la nostra conoscenza degli aspetti teorici della pneumatica, vi è un aspetto molto importante di questa scienza sul quale siamo informati: l'uso sistematico del metodo sperimentale. Gli apparecchi descritti nei primi capitoli (considerati autentici) dell'opera di Filone non sono, infatti, né oggetti destinati a provocare meraviglia, né, nella maggior parte dei casi, strumenti utili; si tratta invece di semplici apparati sperimentali, destinati a mettere in evidenza particolari fenomeni, come quelli relativi al principio del sifone. Alcuni degli esperimenti dimostrativi di Filone (come quello sulla variazione della pressione dell'aria contenuta in una campana sommersa in seguito alla combustione di una candela[78]) sono ancora usati nelle nostre scuole per insegnare il metodo sperimentale. Erone, all'inizio della sua *Pneumatica*, attingendo con ogni probabilità a Ctesibio o a Stratone di Lampsaco, scrive che il vuoto è impossibile in natura, ma può essere in parte creato artificialmente (come del resto mostra in più occasioni nel seguito dell'opera). In particolare Erone spiega che la distribuzione naturale di particelle e vuoto nell'aria può essere alterata in ambedue i sensi applicando delle forze esterne, nonostante l'aria si opponga a tali deformazioni con una reazione elastica.[79]

[75] Una traduzione inglese del testo arabo e i testi latini sono stati pubblicati in [Prager: Filone]; l'introduzione di Prager è probabilmente il più interessante saggio moderno sull'antica pneumatica. Il riferimento standard sull'argomento è [Drachmann KPH].

[76] Prager pensa che risalgano a Filone, oltre ai capp. 1-21 rimasti anche in latino, solo i capp. 37-39 ([Prager: Filone], p. 66).

[77] Cfr. più avanti, §4.5.

[78] Filone di Bisanzio, *Pneumatica*, viii; [Prager: Filone], p. 136.

[79] Erone, *Pneumatica*, I, proemio; [Heronis OO], vol.1, 24, 20 sgg.

La pneumatica, presentandosi sin dal suo fondamento come la teoria di fenomeni provocabili solo artificialmente, è molto lontana dalla filosofia naturale e in particolare da quella aristotelica.[80] Essa fornisce un'altra testimonianza della stessa rivoluzione di pensiero illustrata nel §1.5 a proposito della meccanica.

Un'altra caratteristica interessante della pneumatica è l'uso di concetti della teoria atomica: l'espansione dei gas, dovuta in particolare al riscaldamento,[81] veniva infatti spiegata con l'aumento, non direttamente osservabile, delle distanze interatomiche. Purtroppo Filone nel testo che ci è rimasto accenna appena a questi aspetti teorici, per i quali rimanda a un'altra sua opera (che non ci è pervenuta), che i manoscritti latini citano con il titolo *De mirabilibus arbitriis*.[82]

3.7. *L'astronomia ellenistica e l'eliocentrismo di Aristarco*

L'astronomia scientifica fu sviluppata in stretta relazione con la matematica sin dal IV secolo a.C. I maggiori astronomi

[80] Aristotele aveva dato diverse "dimostrazioni" dell'impossibilità del vuoto (*Physica*, IV, 6-9, 213a-217b). Come Archimede nel caso del traino della nave (cfr. §1.5), Ctesibio supera le obiezioni aristoteliche progettando macchine che creano fenomeni non osservabili in natura. Si era creduto che un'affermazione di Erone (*Pneumatica*, I, ii; [Heronis OO], vol.1, 36, 8-18) spiegasse il funzionamento del sifone con l'impossibilità del vuoto. Questa interpretazione era però basata su un emendamento dei filologi, che, pur di ricondurre Erone nell'ambito dell'ortodossia aristotelica, avevano trasformato un punto interrogativo in un punto in alto. Questa, almeno, è la conclusione raggiunta da Prager confrontando il testo in [Heronis OO] con il codice della *Pneumatica* conservato nella Biblioteca Marciana ([Prager: Filone], p. 21).

[81] Alcune idee elaborate dalla scienza ellenistica sui fenomeni termici ci sono trasmesse dalle *Questioni conviviali* di Plutarco. È particolarmente interessante l'affermazione che la lana non riscalda perché "calda" in sé, ma per il suo potere isolante (*Quaest. conviv. libri vi*, 691C- 692A). Forse anche l'opinione riferita da Plutarco che "più caldo" significhi "più veloce" (*Quaest. conviv. libri vi*, 677E) potrebbe avere un'origine scientifica. Naturalmente le nostre idee sulla scienza antica potrebbero chiarirsi notevolmente se qualcuno organizzasse delle raccolte sistematiche di frammenti e testimonianze sulle varie teorie scientifiche.

[82] Filone di Bisanzio, *Pneumatica*, iii; [Prager: Filone], 129. Il termine *arbitria* era stato interpretato da più autori come una corruzione (attraverso l'arabo) di "automi" o "organi" (considerati forse i soli argomenti "mirabili" della pneumatica). Il contesto mostra però chiaramente che l'opera non riguardava automi o organi, ma il moto degli atomi nel vuoto (come notato in [Prager: Filone], p.129). Il solo titolo non permette di azzardare congetture sul contenuto dell'opera. Si può notare però che lo sviluppo della pneumatica nel III secolo a.C. aveva certamente influenzato le idee sul moto degli atomi e che Lucrezio, nel bel brano sul moto caotico degli atomi e del pulviscolo che abbiamo ricordato a p. 38, n. 32 (*De rerum natura*, II, 112-141), certamente aveva attinto a fonti ellenistiche. D'altra parte sul moto disordinato del pulviscolo illuminato

di cui abbiamo notizia furono Eudosso di Cnido (che abbiamo già incontrato come matematico), Callippo ed Eraclide Pontico nel IV secolo a.C.; Aristarco di Samo, Conone di Samo [83] e Archimede [84] nel III secolo a. C.; Apollonio di Perga (più famoso per il trattato sulle sezioni coniche) tra il III e il II secolo a.C.; Seleuco e Ipparco nel II secolo a.C. Dopo Ipparco le ricerche astronomiche si interrompono.

Di tutte le opere astronomiche degli scienziati finora nominati ci restano solo due lavori del tutto minori: quello, che abbiamo già ricordato, di Aristarco (*Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*) [85] e uno di Ipparco (*Commentario ai 'Fenomeni' di Arato e di Eudosso*), che si è salvato grazie alla popolarità del poema di Arato, di cui costituiva un commento critico. A queste due opere si può aggiungere un famoso passo dell' *Arenario* di Archimede, in cui è descritta la teoria eliocentrica di Aristarco di Samo. Le informazioni contenute in questi scritti sono ben poche. L'opera sopravvissuta di Aristarco, infatti, ci illumina sul metodo scientifico del suo autore e sull'uso di metodi trigonometrici, ma è essenzialmente un'opera di geometria, senza relazione con il problema fondamentale dell'astronomia: la descrizione del moto dei corpi celesti. Considerazioni analoghe valgono per il commento di Ipparco al poema di Arato, che fornisce solo coordinate angolari di stelle fisse. In definitiva l'unico testo contemporaneo che dà qualche informazione sui modelli adottati nel primo ellenismo per descrivere il moto dei pianeti è il passo dell' *Arenario*; si tratta però solo di una breve digressione, che, in un contesto diverso, accenna a un argomento astronomico.

In epoca imperiale, nel II secolo d.C., Claudio Tolomeo compose l'unica opera astronomica importante che ci sia rimasta: la *Sintassi matematica*, più nota con il nome di *Almagesto*, datole dagli Arabi. [86]

da un raggio di sole avevano già scritto Anassagora e Democrito, come sappiamo da Plutarco (*Quaest. conviv. libri iii*, 722A-B).

[83] Conone è noto soprattutto perché Callimaco nella *Chioma di Berenice* (tradotta da Catullo) ne parla come di colui che aveva spiegato il moto degli astri; si deve pensare che avesse dato veramente importanti contributi alla scienza, perché Archimede ne parla più volte con ammirazione (nelle introduzioni ai trattati *Quadratura della parabola*, *Sulla sfera e sul cilindro* e *Sulle spirali*) e Apollonio di Perga sottolinea l'importanza di alcuni suoi teoremi di teoria delle coniche (Apollonio di Perga, *Coniche*, prefazione al IV libro; il passo è riportato più avanti, a p. 113).

[84] L'attività astronomica di Archimede, oltre che in accenni nelle sue opere superstiti, è documentata in un passo di Ipparco riferito da Tolomeo (*Almagesto*, III, i, 195).

[85] Cfr. sopra, p. 87 e n. 45.

[86] L'unica edizione critica dell' *Almagesto* è quella di Heiberg (Leipzig, 1898-1903), i cui numeri di pagina stiamo riportando nelle citazioni. Una traduzione recente è [Toomer: *Almagesto*].

Due risultati di Ipparco, ricavabili dall' *Almagesto*, sono sufficienti a dare un'idea del livello dell'astronomia dei suoi tempi dal punto di vista dell'accuratezza delle misure: Ipparco aveva scoperto la precessione degli equinozi e aveva probabilmente misurato la distanza media della Luna, determinandola in 59 raggi terrestri.[87]

Del difficile problema di tentare di ricostruire le idee fondamentali dell'astronomia del III e II secolo a.C. ci occuperemo nel cap. 9. Faremo ora solo poche osservazioni sull'eliocentrismo di Aristarco. Secondo quanto è riferito, tra gli altri, da Archimede,[88] Plutarco[89] e Simplicio,[90] Aristarco aveva formulato una teoria che attribuiva alla Terra un moto di rivoluzione attorno al Sole e un moto di rotazione diurno attorno a un asse inclinato rispetto al piano dell'orbita. Secondo Archimede, Aristarco, per spiegare come mai il moto della Terra non avesse alcun effetto di parallasse sulle stelle, aveva supposto che la sfera delle stelle fisse fosse immensa rispetto all'orbita della Terra intorno al Sole; più precisamente aveva supposto che il rapporto tra il raggio dell'orbita terrestre e quello della sfera delle stelle fisse fosse eguale al rapporto tra centro e raggio di una sfera; Archimede critica questa affermazione, sostenendo che il rapporto è necessariamente non nullo.[91]

[87] Risale certamente a Ipparco l'osservazione (riportata anche in Plutarco, *De facie....*, 921D) che la parallasse lunare è misurabile. La distanza di 59 raggi terrestri è ottenuta nell'*Almagesto* (V, xiii, 416) con un procedimento viziato da una serie di errori che si cancellano miracolosamente. Toomer ha suggerito che si trattasse del valore ottenuto da Ipparco e noto a Tolomeo ([Toomer HDSM]). La distanza media tra i centri dei due corpi è di poco più di 60 raggi terrestri. Quella riportata da Tolomeo è quindi un'ottima approssimazione; l'accuratezza sarebbe eccezionale se la misura corrispondesse alla distanza tra le superfici (che è il dato direttamente misurabile). Aristarco, che suppone trascurabile il raggio terrestre rispetto alla distanza Terra-Luna, non ha motivo di distinguere tra le due possibilità, ma si riferisce comunque alla distanza della Luna dall'occhio dell'osservatore (*Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*, prop.11).

[88] Archimede, *Arenario*, 135-136 (ed. Mugler).

[89] Plutarco, *De facie...*, 6, 923 A.

[90] Simplicio, *In Aristot. de caelo*, [CAG], vol. VII, p. 444.

[91] La terminologia di Aristarco e la critica di Archimede richiedono una parentesi di carattere matematico. Aristarco aveva supposto anche che il rapporto tra la Terra e l'orbita della Luna fosse eguale al rapporto tra un punto e una circonferenza (*Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*; ipotesi 2); la stessa terminologia è usata da altri autori. Mi sembra che lo scopo dell'*Arenario* potrebbe essere stato proprio quello di difendere l' "assioma di Archimede" (cfr. sopra, §2.7), mostrando la possibilità di determinare un rapporto, finito e non nullo, per ogni coppia di lunghezze (o altre grandezze omogenee) non nulle. Occorreva, a tal fine, elaborare un sistema di numerazione che permettesse di esprimere anche i più grandi rapporti considerabili tra grandezze omogenee, come quello tra i volumi della sfera delle stelle fisse

Archimede scrive che Aristarco ὑποθέσιών τινων ἐξέδωκεν γραφάς (ha pubblicato degli scritti su alcune "ipotesi").[92] È importante capire il significato che ha qui il termine "ipotesi" (ὑπόθεσις).

Il significato originario del termine, cioè quello di "base", "fondamento", in greco non viene mai meno: Aristotele usa l'espressione ὑπόθεσις τῆς πολιτείας per "fondamento del governo" e Teofrasto parla di ὑπόθεσις δένδρων nel senso di "base degli alberi"; in ambedue i casi non vi è nulla di "ipotetico", nel senso a noi familiare. In filosofia il termine fu usato per indicare il fondamento logico di una catena di deduzioni e nelle "teorie scientifiche" per indicare quelli che noi chiameremmo i "principi".[93] Vi era però un'importante differenza rispetto ai "principi", nel senso in cui questa parola è usata, ad esempio, nell'opera di Newton. Gli scienziati del periodo aureo non cercavano di stabilire la verità delle *ipotesi* della teoria; si trattava di assunzioni iniziali, che avrebbero potuto essere sostituite da altre, dando luogo a una teoria diversa.[94] Quando il metodo scientifico fu dimenticato, la potenziale sostituibilità delle "ipotesi" di una teoria non poté più essere compresa. Ogni affermazione essendo concepita come o vera o falsa, le "ipotesi" furono interpretate rozzamente come qualcosa della cui verità non si era certi, originando il significato attuale della parola. Quando nel Rinascimento si risentì parlare dell'"ipotesi" di Aristarco, si dette alla parola il nuovo significato, trasformando così la consapevolezza metodologica con cui gli antichi scienziati avevano costruito "modelli teorici" in insicurezza su affermazioni riguardanti la natura.

e di un granello di sabbia, come fa appunto Archimede nell' *Arenario*. La scomparsa della posizione contro la quale Archimede polemizza ha reso poco comprensibile la sua opera (che è sempre apparsa strana). Non si deve considerare l'affermazione di Aristarco un banale errore solo perché affermazioni di quel tipo non hanno avuto alcun ruolo nei ventitré secoli trascorsi da Aristarco alla recente creazione dell' "analisi non standard". Se la storia della matematica per ventitré secoli ha seguito la strada tracciata da Archimede, ciò non implica che altre formulazioni più antiche fossero necessariamente prive di possibilità di sviluppo coerente.

[92] Nella storia dell'astronomia di Dreyer, si spiega che, seguendo Bergk, le parole di Archimede vanno tradotte "ha pubblicato in abbozzo certe ipotesi" ([Dreyer]; p.124). Spesso gli "Antichi" sono stati ridotti a poter solo *abbozzare* (o *prefigurare*) i propri risultati.

[93] Sesto Empirico, ad esempio, usa il termine ὑπόθεσις per i postulati della geometria (cfr., ad esempio, *Adversus Mathematicos*, III, 1 sgg.).

[94] Diogene Laerzio, ad esempio, riferisce di critiche alla posizione di coloro che invece di postulare semplicemente le affermazioni più elementari avrebbero voluto farle accettare come credibili (Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, IX, 89). Epicuro sembra anticipare questo atteggiamento metodologico quando afferma che chi mostra di preferire una spiegazione causale a un'altra altrettanto compatibile con le "apparenze" (φαινόμενα) cade nel pensiero mitico (*Lettera a Pitocle*, in Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, X, 87).

Plutarco, nel *De facie...* riferisce che Aristarco aveva cercato di "salvare le apparenze (φαινόμενα σῴζειν)" assumendo i moti di rotazione e di rivoluzione della Terra. Poiché la descrizione dei moti apparenti del Sole, della Luna e delle stelle fisse non può in alcun modo essere alterata dall'eliocentrismo, le "apparenze" cui si riferiva Aristarco riguardavano evidentemente i pianeti. Archimede scrive nell' *Arenario* che Aristarco aveva prodotto delle ἀποδείξεις τῶν φαινομένων (*illustrazioni* o *dimostrazioni* delle *apparenze*).[95] Esse evidentemente consistevano nel mostrare che i complessi moti planetari, con stazioni e retrogradazioni, potevano essere ottenuti combinando due semplici moti circolari uniformi attorno al Sole: quello assunto per la Terra e un altro analogo per il pianeta.

Le "illustrazioni" di Aristarco potevano divenire particolarmente efficaci costruendo un modello meccanico dei moti dei pianeti. Sappiamo che un planetario mobile che riproduceva i moti apparenti del Sole, della Luna e dei pianeti era stato effettivamente costruito da Archimede. Ci si è chiesto in genere come avesse fatto Archimede a realizzarlo, sottintendendo che nel suo modellino Sole e pianeti si muovessero, indipendentemente tra loro, su meccanismi incernierati su una "Terra" immobile.[96] È chiaro che si può pensare a un meccanismo di questo tipo (estremamente difficile da costruire) solo se non si sa della possibilità di "illustrare le apparenze" seguendo la proposta di Aristarco. Poiché noi sappiamo di questa possibilità perché l'abbiamo letta nell' *Arenario*, supporre che Archimede non ne avesse fatto uso è almeno strano. L'idea che Archimede avesse costruito un planetario "geocentrico" nasce probabilmente dal fatto che secondo tutte le testimonianze il congegno rappresentava il moto del Sole e dei pianeti attorno alla Terra. È importante chiarire questo punto. Lo scopo di spiegare le "apparenze" così come sono osservate dalla Terra non è raggiunto da una macchina che rappresenti solo il moto dei pianeti rispetto al Sole. Se quindi si costruisce un modello meccanico nel quale la Terra e i pianeti ruotano intorno al Sole, per mostrare i moti effettivamente osservati occorre mettere in moto il congegno tenendo fissa la Terra.[97] Ciò che rende un planetario "elio-

[95] Archimede, *Arenario* (ed. Mugler), 136.

[96] Cfr., ad esempio, [Neugebauer HAMA], p. 652, n. 7, dove si sostiene che un planetario costruito sulla base di un modello sferico non può mostrare neppure le principali caratteristiche del moto dei pianeti: retrogradazioni e stazioni.

[97] Naturalmente se si vuole solo mostrare il moto "vero", senza alcun interesse a ciò che può effettivamente essere osservato, ci si può accontentare di un modello eliocentrico "puro". Questo atteggiamento mi sembra però lontano da quello con cui Aristarco aveva costruito un modello che "salvasse le apparenze" (spiegasse cioè i fenomeni) ed è molto più "moderno". È infatti tipico della

centrico" è il fatto (essenziale!) che il collegamento meccanico tra i vari pianeti e la Terra avviene attraverso un unico snodo posto nel Sole, sufficiente per generare moti relativi a volte diretti e a volte retrogradi. La congettura che il planetario di Archimede fosse di questo tipo ha un importante sostegno nella principale testimonianza sull'argomento, quella di Cicerone, che scrive:

> L'invenzione di Archimede è da ammirarsi in quanto egli aveva escogitato in qual modo una sola "conversio" potesse riprodurre i diversi e vari percorsi, con moti tra loro contrastanti.[98]

La parola *conversio* può significare "rotazione", "inversione", "rovesciamento". Sarebbe certo una parola adatta per indicare uno "snodo" che permetta di generare moti retrogradi. In ogni caso l'insistenza sull'unicità del meccanismo dal quale dipendono moti tra loro tanto diversi non sarebbe compatibile con un modello meccanico che riproducesse un algoritmo di tipo "tolemaico".

Sappiamo da un passo di Pappo che furono costruiti anche planetari azionati con un meccanismo idraulico.[99]

Un altro planetario mobile dell'antichità di cui abbiamo notizia fu quello, al quale anche accenna Cicerone, costruito da Posidonio nel I secolo a.C.[100] Mentre non sappiamo che nessuno sia mai riuscito a costruire un meccanismo "tolemaico" in grado di rappresentare il moto dei pianeti, dopo la "rivoluzione copernicana" (realizzata anche grazie alla traduzione di Commandino dell' *Arenario* di Archimede) fummo di nuovo in grado di costruire planetari mobili (ovviamente "eliocentrici").

La storia dei planetari suggerisce quindi che la teoria eliocentrica potrebbe non essere stata abbandonata subito dopo Aristarco, come in genere si è sostenuto,[101] ma durante l'inter-

didattica contemporanea abituare gli studenti a credere sin dalla più tenera età nel moto della Terra attorno al Sole (come anche, ad esempio, in quello degli elettroni intorno al nucleo) senza conoscere alcun fenomeno spiegato da tali moti.

[98] "...in eo admirandum esse inventum Archimedi, quod excogitasset, quem ad modum in dissimillimis motibus inaequabiles et varios cursus servaret una conversio" (Cicerone, *De re publica*, I, xiv, 22). Cicerone riferisce osservazioni contenute in un'opera perduta di Sulpicio Gallo, che aveva potuto vedere il planetario di Archimede nella casa del suo collega di consolato Marco Marcello (che lo aveva ereditato dal nonno, il Marcello saccheggiatore di Siracusa). Lo stesso concetto (di una sola *conversio* dalla quale dipendevano tutti i moti) è esposto da Cicerone in *Tusculanae disputationes*, I, xxv, 63.

[99] Pappo, *Collezione*, VIII, 1026, 2-4 (ed. Hultsch).

[100] Cicerone, *De natura deorum*, II, xxxiv, 88.

[101] L'idea che Aristarco fosse troppo in anticipo sui tempi per influenzare durevolmente il corso della scienza è suggerita anche dall'episodio, spesso ri-

ruzione dell'attività scientifica successiva a Ipparco. Torneremo su questo punto nel capitolo nono.

3.8. *Moti della Terra e relatività del moto*

Aristarco non fu il primo ad attribuire dei moti alla Terra. Già Eraclide Pontico, nel IV secolo a.C., aveva sostenuto la rotazione terrestre diurna [102] e la stessa teoria è attribuita anche ai pitagorici Iceta ed Ecfanto. [103]

Si tratta di precedenti importanti, dei quali l'eliocentrismo di Aristarco è un naturale sviluppo. Se l'alternarsi del giorno e della notte viene spiegato attribuendo un moto alla Terra, diviene infatti naturale per gli astronomi spiegare in modo analogo il moto retrogrado dei pianeti. Attribuire per la prima volta un moto alla Terra richiede invece una trasformazione profonda dei concetti di spazio e di moto. Non a caso Tolomeo, che condivide la concezione aristotelica dello spazio, non rifiuta solo l'eliocentrismo ma nega anche la rotazione terrestre diurna e in età moderna i due moti furono accettati contemporaneamente. [104]

Gli uomini di tutte le civiltà prescientifiche hanno sempre parlato di "quiete" o di "moto" dei corpi in assoluto, senza cioè avere alcun bisogno di specificare rispetto a quale "sistema di riferimento" fosse considerato il moto. Dal nostro punto di vista ciò era reso possibile dall'uso implicito di un sistema di riferimento fisso con la Terra, ma tale uso implicito precede evidentemente il concetto di "sistema di riferimento". Aristotele crede ancora in uno spazio assoluto, contenente luoghi di diversa na-

petuto, dell'accusa di empietà che l'eliocentrismo avrebbe provocato nei suoi confronti. La notizia sarebbe riferita da Plutarco (*De facie quae in orbe lunae apparet*, 923A). In realtà l'accusa di empietà ad Aristarco risale al filologo del XVII secolo G. Ménage, il quale (evidentemente influenzato dai processi a Bruno e a Galileo) per poter leggere l'accusa in Plutarco scambiò tra loro un accusativo e un nominativo, stravolgendo il significato del passo. Gli editori successivi, considerando forse inevitabile la relazione tra eliocentrismo ed empietà, hanno accettato quasi senza eccezioni l'emendamento al testo di Plutarco, che è divenuto canonico nella versione "modernizzata" dal Ménage. Per maggiori informazioni su questo illuminante episodio si rimanda a [Medaglia Russo].

[102] La principale fonte che ci è rimasta è Simplicio, *in Aristot. de caelo*, [CAG], vol. VII, p. 541. Questa e le altre fonti sono discusse in [Heath Aristarchus], pp. 249-283. Cfr. anche [Neugebauer HAMA], pp. 694-696.

[103] Cfr., ad esempio [Heath Aristarchus], pp.187-188, 251-252. Le scarse informazioni che abbiamo su questi due pitagorici risalgono a Diogene Laerzio, Aezio e Ippolito.

[104] Ricordiamo che l'obiezione al copernicanesimo basata sull'autorità della Bibbia non negava il moto di rivoluzione, ma la rotazione terrestre.

tura, uno dei quali, con la proprietà di attirare i corpi pesanti, era divenuto (grazie a questa sua proprietà) il centro del mondo. Questa concezione dello spazio è strettamente connessa all'idea che lo stato di moto assoluto dei corpi sia osservabile.

Se, accettando l'idea dello spazio assoluto, si osa ipotizzare un moto (assoluto) della Terra, come fece per primo Eraclide, la stessa concezione di moto assoluto non può non entrare in crisi. Bisogna infatti accettare l'idea di muoversi a velocità superiori ai 1000 km/h (quali sono le velocità dovute alla rotazione terrestre alle latitudini delle città ellenistiche) senza rendersene conto. Si capisce allora che le osservazioni (cioè le "apparenze" di Aristarco) non danno indicazioni sul "vero" stato di moto dei corpi, ma possono essere spiegate con diverse "ipotesi" su quali siano in realtà i corpi fermi.[105] Tali ipotesi divengono equivalenti, purché permettano di "salvare le apparenze", cioè di dedurre ciò che viene osservato. Nasce così l'idea di poter scegliere il "sistema di riferimento" al quale riferire le posizioni dei corpi.

L'attribuzione di moti alla Terra aveva finito realmente per generare, in epoca ellenistica, una concezione relativistica del moto? Mi sembra che una risposta affermativa possa essere dedotta dai punti seguenti.

- L'osservazione che le "apparenze" viste dipendono solo dal movimento relativo tra l'osservatore e l'oggetto osservato è già nell' *Ottica* di Euclide (cfr. la proposizione 51).
- Archimede, nel riferire nell' *Arenario* la teoria di Aristarco, si guarda bene dal muovere obiezioni "fisiche" (pur criticandone, come abbiamo visto, la formulazione matematica) e usa l'ipotesi di Aristarco solo per dedurre dall'assenza di parallassi stellari una stima sul diametro della sfera delle stelle fisse. Gli interessa quindi il moto della Terra non in assoluto, ma rispetto alle stelle fisse. Naturalmente, se, come Archimede, si crede all'esistenza della sfera delle stelle fisse,[106] l'esistenza di un tale sistema di riferimento, privilegiato in modo naturale, diminuisce l'importanza del "relativismo" (e forse si perde anche l'occasione di enunciarlo), ma, in linea di principio, una cosa è riferire i moti a dei corpi di riferimento "naturali", come le stelle, e un'altra, ben diversa, è considerare moti "assoluti", relativi cioè allo spazio vuoto. Il punto essenziale è che Archimede

[105] Naturalmente, in base alla nostra "meccanica classica", non tutti i sistemi di riferimento sono equivalenti e un sistema di riferimento fisso con la Terra non è inerziale. Poiché però i moti della Terra, rispetto ai moti dell'esperienza quotidiana, hanno velocità enormi e accelerazioni piccole, questo effetto in prima approssimazione può essere trascurato.

[106] L'esistenza della sfera delle stelle fisse era stata comunque posta in dubbio già prima di Archimede, nel IV secolo a.C. Torneremo su questo punto nel §9.9.

non pensa di avere alcun modo per verificare l'eventuale moto della Terra rispetto alle stelle con esperimenti terrestri.[107]

• Tolomeo, nell'esporre nell'*Almagesto* la propria teoria dell'immobilità della Terra, accenna all'opinione contraria, riguardante in particolare la rotazione diurna, contro la quale egli afferma di non avere argomenti astronomici, ma solo "terrestri". L'opinione riferita e confutata da Tolomeo non consiste nell'ipotizzare una rotazione della Terra, ma è un'opinione relativistica. Tolomeo afferma infatti che secondo alcuni astronomi non solo la rotazione può essere attribuita equivalentemente o alla Terra o al cielo, ma anche ad ambedue, purché entrambe le rotazioni siano attorno allo stesso asse e la loro differenza (cioè il moto relativo) sia quella osservata.[108]

• Molte opere ellenistiche o basate su fonti ellenistiche illustrano la relatività del moto. Il passo più famoso è forse quello di Lucrezio sui passeggeri di una nave cui sembra che la nave sia ferma e la terraferma si muova; diversi altri passi sullo stesso argomento sono raccolti da Neugebauer.[109] Da alcuni autori la relatività del moto è usata come illustrazione della generale possibilità di usare diverse "ipotesi", tra loro equivalenti, per spiegare determinate "apparenze".[110]

Osserviamo che, mentre l'attribuire dei moti alla Terra genera naturalmente delle posizioni "relativistiche", queste posizioni, a loro volta, possono far apparire poco rilevante la questione degli eventuali moti della Terra. I punti precedenti possono quindi spiegare anche perché le fonti ellenistiche successive ad Aristarco, a cominciare da Archimede, siano apparse ai moderni così "fredde" sulla questione dell'eliocentrismo da generare la convinzione che esso fosse stato subito abbandonato.[111]

Una conferma a quest'ultima osservazione viene da uno dei maggiori studiosi moderni dell'astronomia antica. J.L.E. Dreyer, che aveva certamente studiato con grande cura tutte le testi-

[107] Archimede discute infatti la compatibilità dell'ipotesi di Aristarco con l'assenza di effetti misurabili di parallasse e accetta come possibile la spiegazione basata sull'enorme distanza delle stelle, senza prendere in considerazione alcun argomento di tipo "tolemaico".

[108] Tolomeo, *Almagesto*, I, vii, 24.

[109] Lucrezio, *De rerum natura*, IV, 387-390; [Neugebauer HAMA], p. 695.

[110] Ad esempio Sesto Empirico afferma che occorre sospendere il giudizio su quali siano i corpi veramente fermi (*Lineamenti del Pirronismo*, I, 107). Vedremo che affermazioni dello stesso tipo risalgono a Erofilo di Calcedonia (cfr. più avanti, p. 166).

[111] Secondo Sesto Empirico i moti della Terra erano accettati dai "seguaci di Aristarco (οἱ περὶ Ἀρίσταρχον)", che evidentemente non era rimasto isolato (*Adversus Dogmaticos*, IV, 174). Agli sviluppi dell'eliocentrismo nel II secolo a.C. accenneremo nel cap. 9.

monianze riguardanti sia Aristarco che gli astronomi successivi, scrive:

> Aristarco fu l'ultimo dei grandi filosofi o astronomi del mondo greco a proporsi seriamente di indagare il vero sistema fisico del mondo. Dopo di lui troviamo varie teorie matematiche geniali che rappresentavano in modo più o meno fedele i moti osservati dei pianeti, ma i cui autori giunsero gradualmente a considerare queste combinazioni di moti circolari come un semplice espediente per poter calcolare la posizione di ogni pianeta in un momento qualsiasi, senza insistere sulla verità fisica del sistema. [112]

Questo passo è molto istruttivo: il fatto che Dreyer pensi che la *verità fisica* di una teoria astronomica sia qualcosa di diverso dalla sua capacità di prevedere la posizione osservabile di ogni pianeta in ogni momento fa sospettare che la metodologia scientifica ellenistica non fosse stata ancora pienamente recuperata all'epoca di Dreyer (la *Storia dell'astronomia* da cui è tratta la citazione è del 1906). Ma in cosa consiste per Dreyer la *verità fisica* di un sistema astronomico? Evidentemente nella sua capacità di determinare i "moti veri" dei pianeti. Dreyer infatti certamente crede a uno spazio assoluto rispetto al quale i moti debbono essere individuati dagli astronomi. [113] Egli, non ritrovando lo stesso concetto negli antichi astronomi, ne trae la facile (ma incauta) deduzione che tale mancanza costituisse un grave limite dell'astronomia ellenistica.

L'atteggiamento degli storici della scienza è cambiato dopo che l'idea di spazio assoluto è stata definitivamente sconfitta. Neugebauer, raccogliendo molti antichi passi che illustrano la relatività del moto, ne conclude che "affermazioni su ovvie equivalenze cinematiche sono un luogo comune nell'antica letteratura". [114] Il riferimento più antico trovato da Neugebauer riguarda però Eraclide Pontico. Neugebauer interpreta l'idea di Eraclide come "relativistica" e la considera "ovvia". Certamente idee del genere non erano state ovvie prima di Eraclide e di nuovo non lo saranno più, dopo la fine del periodo ellenistico, almeno fino a Dreyer. Neugebauer afferma in più luoghi di non capire

[112] [Dreyer], p.135.

[113] La relatività galileiana, come è ben noto, era stata rifiutata da Newton. L'idea dello spazio assoluto fu poi rafforzata dalla teoria dell'etere, dominante all'inizio del Novecento. Le posizioni relativistiche riacquistarono la supremazia solo grazie a Einstein, il cui primo lavoro sulla relatività ristretta (*Sull'elettrodinamica dei corpi in moto*, del 1905) è praticamente contemporaneo alla *Storia dell'astronomia* di Dreyer e, trattandosi di un difficile lavoro tecnico, non poté certo influenzare istantaneamente le concezioni esposte in un'opera storica come quella di Dreyer.

[114] [Neugebauer HAMA], p. 695.

la tradizionale importanza data alla rivoluzione copernicana: un sistema di riferimento fisso con il Sole gli sembra equivalente a uno fisso con la Terra, se non si possiede (come Copernico non possedeva) una dinamica che permetta di privilegiare uno dei due. Evidentemente idee come quella di poter scegliere liberamente il sistema di riferimento non sono solo difficilissime da conquistare: una volta acquisite, è anche difficilissimo liberarsene per poterne apprezzare la profondità.

3.9. *L'astronomia di Tolomeo*

L'unica teoria astronomica greca ben conosciuta è quella esposta da Tolomeo nell'*Almagesto*. Rinviando al capitolo nono un confronto tra le concezioni del primo ellenismo e quelle di Tolomeo su argomenti quali lo spazio e il moto, limitiamoci qui ad alcune osservazioni sul modello matematico usato nell'*Almagesto*. È ben noto che la teoria planetaria di Tolomeo è basata sulla composizione di moti circolari uniformi. L'idea era già stata usata in astronomia da Apollonio di Perga ma era certamente molto più antica: il primo algoritmo di questo tipo di cui abbiamo notizia era stato elaborato da Eudosso, che aveva descritto i moti dei pianeti come ottenuti con una successione di sfere concentriche ruotanti uniformemente, ciascuna con l'asse di rotazione individuato da due punti fissi rispetto alla sfera precedente.

Poiché sono ancora molto diffuse strane idee su questi metodi di decomporre i moti, notiamo innanzitutto esplicitamente le due ragioni principali che li rendevano estremamente efficienti.

1. La descrizione del moto osservato dei pianeti come risultante dalla composizione di una successione di moti uniformi su orbite circolari, la prima (detta spesso, con termine medievale, *deferente*) avente per centro la Terra e ciascuna delle altre (*epicicli*) centrata nel punto che descrive la circonferenza precedente, è equivalente alla moderna "espansione in serie di Fourier" e permette di descrivere effettivamente i moti osservati con una precisione tanto maggiore quanto maggiore è il numero degli epicicli usati.

L'analogia tra decomposizione in serie di Fourier e sviluppo in epicicli fu osservata da Schiaparelli,[115] ma si può dubitare che l'osservazione fosse più antica.[116] Una dimostrazione for-

[115] [Schiaparelli], parte I, tomo II, p.11.

[116] Può venire il dubbio, infatti, che in questa importante osservazione Schiaparelli sia stato preceduto dai matematici che svilupparono l'idea delle

male dell'equivalenza è stata data recentemente da Giovanni Gallavotti.[117]

2. Poiché il principale strumento di calcolo della matematica ellenistica era l'algebra geometrica basata su riga e compasso, la decomposizione in moti circolari era il sistema più efficiente possibile per calcolare le posizioni osservabili dei pianeti. Se, per esempio, il moto di un pianeta è descritto dalla combinazione di tre moti circolari uniformi complanari, per calcolarne la posizione in un dato istante basta tracciare tre archi di circonferenza e misurare tre angoli. Il calcolo viene ridotto cioè a sei "operazioni elementari", effettuabili con due semplici strumenti: un compasso e un goniometro.[118]

Nell'opera di Tolomeo il numero di moti circolari necessari per ottenere un buon accordo con i dati sperimentali viene ridotto a due (un "deferente" e un epiciclo) mediante l'introduzione di eccentrici (spostando cioè il centro del "deferente" dalla posizione della Terra) e di equanti (supponendo cioè che i moti considerati non siano circolari uniformi, ma abbiano velocità angolare costante rispetto a un punto, detto punto equante, diverso dal centro del cerchio).[119] Queste modifiche, pur rompendo la simmetria dei moti circolari uniformi, avevano la caratteristica essenziale di non rendere in nulla più complesse le operazioni concrete necessarie per effettuare i calcoli: l'uso di eccentrici e di equanti equivaleva infatti semplicemente a uno spostamento del punto nel quale dovevano essere centrati i due strumenti fondamentali: rispettivamente il compasso e il goniometro. Ciò mostra che l'uso di moti circolari non era dovuto, come in genere si dice, a motivi estetici o di simmetria, ma all'esigenza concreta di elaborare un algoritmo che ridu-

espansioni in serie di Fourier. La prima idea di una tale espansione risale, nel XVIII secolo, a Daniel Bernoulli, che si era occupato anche del moto dei pianeti e non poteva certo ignorare gli sviluppi in epicicli. Quanto a Joseph Fourier, che sviluppò le espansioni che portano il suo nome in relazione alla propagazione del calore, si tratta, oltre che di un geniale matematico, anche di uno studioso delle antiche civiltà egizia e alessandrina (dopo aver seguito Napoleone in Egitto, egli fu il primo segretario dell' *Institut d'Egypte*). Poté non riconoscere il rapporto tra l'antico sistema degli epicicli e le analoghe "decomposizioni" di cui si occupò negli anni successivi al suo ritorno in Francia?

[117] G. Gallavotti, *I moti quasi periodici da Ipparco a Kolmogorov*. Questo lavoro (rimasto finora inedito) contiene un'interessante traduzione in termini della matematica moderna delle principali idee dei sistemi usati da Ipparco, Tolomeo e Copernico.

[118] Pochi epicicli sono in realtà sufficienti per prevedere la posizione di un pianeta con la precisione corrispondente ai dati sperimentali moderni.

[119] Sull'effettivo uso di eccentrici ed equanti si può leggere [Neugebauer HAMA] o, per una informazione più rapida, qualsiasi altra storia dell'astronomia, per esempio [Dreyer].

cesse i calcoli necessari a semplici operazioni eseguibili con strumenti elementari.[120]

Analogamente a quanto abbiamo visto nel §2.3 per la matematica, la connessione tra le strutture teoriche della scienza e gli strumenti materiali usati ha un'ulteriore prova nel fatto che l'uso di tavolette di argilla come materiale di scrittura indirizzò in Mesopotamia anche l'astronomia in una direzione diversa da quella "alessandrina".[121] L'astronomia mesopotamica non usò infatti costruzioni geometriche come gli epicicli di Tolomeo, ma lo studio di regolarità numeriche. Anche se l'astronomia mesopotamica è ancora poco nota, è chiaro[122] che, mentre l'astronomia paleobabilonese era stata prescientifica e qualitativa, l'astronomia matematica mesopotamica sviluppata in epoca ellenistica è di un livello confrontabile con quello della contemporanea astronomia basata su metodi geometrici.[123] Anche se i metodi matematici usati sono diversi, vi sono evidenti scambi culturali, come dimostrato non solo dalla contemporaneità della nascita dell'astronomia scientifica, ma anche da influenze reciproche: ad esempio gli astronomi alessandrini adottarono il sistema sessagesimale mesopotamico e l'astronomo mesopotamico Seleuco ci è noto come un seguace di Aristarco di Samo.

3.10. *Alcune osservazioni sulla matematica applicata*

Sembra chiaro da quanto detto finora che la scienza esatta ellenistica fu caratterizzata innanzitutto da quella che avevamo individuato come caratteristica generale della scienza esatta: l'esistenza di rigorose "teorie scientifiche" assiomatico-deduttive, che si occupano di enti teorici, e di trasparenti e consapevoli "regole di corrispondenza" tra questi enti e gli oggetti reali. La teoria principale, che è la matematica euclidea, oltre a essere di-

[120] Non si può dedurre, mi sembra, che gli scienziati ellenistici privilegiassero il cerchio per la sua "perfezione" dalla presenza di quest'idea in autori del periodo classico e dell'età imperiale; anche perché questi ultimi, non comprendendo il metodo scientifico ellenistico, inquadravano spesso i risultati scientifici in schemi concettuali propri della filosofia naturale prescientifica.

[121] Con questo termine, come nel caso della matematica, intendiamo quella tradizione scientifica omogenea, sviluppata in epoca ellenistica nel mondo mediterraneo di lingua greca, che ebbe in Alessandria il suo maggior centro.

[122] Grazie al lavoro di decifrazione di tavolette cuneiformi effettuato nel corso del XX secolo. Le tavolette di contenuto astronomico decifrate prima del 1955 sono state pubblicate in [Neugebauer ACT].

[123] Per un resoconto dei fatti noti sulla storia dell'astronomia mesopotamica in epoca ellenistica si può leggere [Neugebauer HAMA], pp. 347-558.

rettamente applicabile, grazie alla sua natura di "teoria della riga e del compasso", fornisce a tutte le altre non solo il modello dello schema concettuale e il principale algoritmo di calcolo (l'algebra geometrica), ma anche i propri risultati, giacché le altre teorie includono tutte tra i propri enti gli enti della geometria. Queste altre teorie, alle quali si dedicano in genere gli stessi scienziati che producono i teoremi di "matematica pura", lasciano tutte trasparire chiaramente i problemi concreti per i quali il modello viene usato.

Come mai è diffusa l'idea che la matematica greca fosse una matematica speculativa, priva di applicazioni al mondo reale? Questa idea ha, credo, soprattutto due origini.

La prima risale alle fonti della tarda Antichità che ci hanno trasmesso il ricordo dei matematici ellenistici. Stobeo, ad esempio, racconta che quando un allievo chiese a Euclide perché fosse utile lo studio della geometria Euclide gli fece dare una monetina da uno schiavo "perché" disse "costui ha bisogno di trarre guadagno da ciò che impara". [124] Da questo aneddoto alcuni storici della scienza traggono la conclusione che Euclide non desse importanza alle applicazioni concrete della matematica. [125] Euclide, però, oltre agli *Elementi* e agli altri trattati di "matematica pura", aveva scritto almeno l'*Ottica* e un trattato di astronomia; evidentemente era interessato alle applicazioni della matematica. Il punto essenziale è che proprio la vastità delle applicazioni che si cominciavano a trarre dalla matematica aveva reso necessaria una divisione del lavoro, nella quale il "matematico" aveva un proprio ruolo, del quale era orgoglioso, che era ben diverso da quello di chi, come l'ingegnere, doveva solo applicare procedimenti matematici elaborati da altri. L'introduzione di quei modelli teorici di aspetti particolari del mondo concreto che sono le "teorie scientifiche", mentre permetteva una nuova efficienza nel risolvere problemi concreti, era anche strettamente connessa alla possibilità, altrettanto nuova, che alcune persone lavorassero all'interno delle teorie stesse. La nascita della scienza fu cioè strettamente connessa all'apparire degli scienziati. Tali scienziati, impegnati nel lavoro teorico, apparvero persone disinteressate agli aspetti concreti della vita alle successive civiltà prescientifiche che ce ne hanno trasmesso il ricordo.

Era proprio la divisione del lavoro tra scienziati e tecnici, d'altra parte, a imporre un estremo rigore a coloro che lavoravano teoricamente, caratterizzando così il nuovo metodo scientifi-

[124] Stobeo, *Eclogae*, II, xxxi, 114 , 2-6.
[125] Cfr., ad esempio, [Boyer], pp. 119-120.

co. Se, infatti, chi ottiene il risultato "matematico" ne conosce anche l'unica applicazione possibile, non è importante che il risultato sia esatto; basta che sia ragionevolmente approssimato, come accadeva in genere nella "matematica" egiziana dell'età faraonica e in quella paleobabilonese (nelle quali non si distingueva, ad esempio, tra formule di aree esatte e approssimate). Quando invece il risultato ottenuto è consapevolmente interno alla "teoria", dovrà cioè essere applicato, spesso in modo mediato, a una varietà di questioni non note a priori, il rigore del matematico diviene essenziale. Si pensi, ad esempio, a una formula per calcolare un'area che non viene usata per calcolare l'area di un campo, ma interviene come passo intermedio in un algoritmo usato in problemi di ingegneria; toccherà all'ingegnere approssimare i risultati in modo ragionevole, ma egli deve avere dei punti di partenza certi sui quali basarsi, senza dover ogni volta ripercorrere tutti i passi logici compiuti dal matematico.

Un buon sistema per capire la vastità delle applicazioni della matematica in un momento storico, in mancanza di informazioni dirette, è quindi quello di esaminarne il livello di rigore.

Nella prefazione al IV libro del suo fondamentale trattato sulle sezioni coniche, Apollonio scrive:

> Inoltre, a parte tale utilità, essi [alcuni teoremi di Conone di Samo] sono degni di essere accettati per amore delle dimostrazioni stesse, allo stesso modo che accettiamo molte altre cose nella matematica per questa e nessuna altra ragione. [126]

Non vi è dubbio che Apollonio sia sincero (e che abbia ragione!) ma le rivendicazioni del valore della scienza pura sono così caratteristiche delle civiltà in cui la scienza assume un ruolo trainante della tecnologia che basterebbero da sole a convincerci dell'esistenza di una matematica applicata ellenistica. Nel caso opposto l'aneddoto di Euclide e le frasi di Apollonio sarebbero infatti privi di senso: nessuno rivendicherebbe in modo così netto il valore della matematica "pura" se non per distinguerla con orgoglio da una matematica applicata esistente e ben nota. Lo stesso fenomeno, del resto, si è verificato anche nel mondo moderno. Mentre Galileo aveva dovuto ingegnarsi a inventare applicazioni pratiche che potessero convincere il governo di Venezia ad aumentargli lo stipendio, quando la fisica ha assunto un ruolo determinante nello sviluppo della tecnologia ha anche potuto permettersi il lusso di produrre dei "fisici teorici" apparentemente disinteressati alle possibili applicazioni delle proprie ricerche.

[126] Apollonio, *Coniche*, prefazione al IV libro.

Tornando ad Apollonio, che viene in genere citato come il tipico rappresentante della "matematica pura", osserviamo che questa impressione è basata soprattutto sulla scelta delle sue opere effettuata nei secoli successivi. Egli infatti aveva scritto sia opere di astronomia che un trattato di catottrica ma queste opere si sono perdute e dell'unica opera conservata parzialmente in greco, il trattato sulle sezioni coniche,[127] si è perduto l'ultimo libro, l'ottavo, che forse era quello dedicato alle applicazioni della teoria.[128]

La seconda origine del mito di una matematica ellenistica "senza applicazioni" è nei mezzi di calcolo introdotti in Età Moderna. Nei tre secoli precedenti l'introduzione dei calcolatori digitali i calcoli venivano effettuati servendosi di:

- operazioni aritmetiche su numeri scritti in notazione decimale;
- tavole numeriche di logaritmi e di alcune altre funzioni, come le funzioni trigonometriche;
- operazioni di analisi (come derivazioni ed integrazioni) su funzioni composte di "funzioni elementari" (cioè di funzioni i cui valori erano stati tabulati).

L'antica algebra geometrica, che sin dall'inizio dell'età moderna era divenuta meno utile per l'uso sistematico del sistema di numerazione posizionale, fu definitivamente superata come algoritmo di calcolo almeno dal 1614 (data della pubblicazione delle prime tavole di logaritmi). La matematica euclidea restò invece un modello ineguagliato di rigore fino al 1872 (data, come abbiamo visto nel §2.5, della fondazione di una teoria rigorosa dei numeri reali). In questo intervallo di tempo i matematici usarono la geometria euclidea come metodo dimostrativo e numeri decimali e tavole di logaritmi per i calcoli necessari per risolvere problemi concreti. Inoltre alcuni antichi problemi (in particolare quelli della trisezione dell'angolo e della duplicazione del cubo e l'ancora più famoso problema della "quadratura del cerchio") che i matematici ellenistici avevano tramandato come insoluti[129] continuarono ad affascinare i matematici e l'esigenza di risolverli con riga e compasso, pur avendo perso la motivazione originaria, fu accettata come una "regola del

[127] Un'altra opera di Apollonio ci è rimasta in traduzione araba ed è dedicata al problema di determinare una retta che intercetti su due semirette assegnate due segmenti con un rapporto dato.

[128] Nella prefazione al VII libro delle *Coniche* Apollonio afferma che i teoremi (sui diametri delle coniche) ivi contenuti potevano essere applicati "a molti tipi di problemi" e che esempi di tali applicazioni sarebbero stati inclusi nell'ottavo libro.

[129] Si tratta di problemi dei quali i matematici moderni solo nel corso del XIX secolo sono riusciti a dimostrare l' irrisolubilità.

gioco", che caratterizzava quelli che furono chiamati i "problemi classici".[130]

Queste circostanze alimentarono la convinzione che la "matematica classica" fosse adatta solo alla teoria, andando così a confermare i pregiudizi in questo senso originati sia dalla perdita del ricordo dell'antica tecnologia che dall'appartenenza della matematica ellenistica a quel "pensiero greco" che si era portati a identificare soprattutto con i prodotti letterari e filosofici del periodo classico.

L'idea di una matematica ellenistica disinteressata alle applicazioni trova la smentita più evidente nella personalità scientifica di Archimede. Archimede aveva scritto un trattato di catottrica e aveva fondato la "scienza delle macchine", trovando il modo di calcolarne teoricamente il vantaggio meccanico; aveva scritto il primo trattato teorico di ingegneria navale, seguendo poi, come vedremo, la costruzione della più grande nave dell'epoca; aveva ideato nuove macchine per il sollevamento dell'acqua e nuove macchine belliche. Archimede aveva in definitiva mostrato (secondo la tradizione anche con esperimenti dimostrativi pubblici, ma in ogni caso con le sue opere) come la filosofia della natura fosse superabile costruendo una scienza che, attraverso la progettazione teorica, fosse profondamente legata alla tecnologia. Non basta: egli aveva perfino spiegato, nel suo trattato *Sul metodo*, come usasse l' "intuizione meccanica" anche per trovare risultati di matematica pura, prima di dimostrarli formalmente.

Molti studiosi, pur di non incrinare il pregiudizio sulla mancanza di applicazioni tecniche della scienza antica ammettendo eccezioni, hanno però giurato sul disinteresse di Archimede per la tecnologia. Tale disinteresse, non avendo alcun riscontro negli scritti rimasti di Archimede e nei fatti documentati, sarebbe consistito in un intimo "sentimento" o "atteggiamento filosofico", che avrebbe costretto Archimede a compiere malvolentieri tutte le sue realizzazioni. Fraser scrive:

> Archimede provava un profondo disprezzo per la meccanica applicata.[131]

[130] È interessante notare che questi problemi avevano tutti e tre un'origine molto concreta. Il problema della trisezione dell'angolo era stato probabilmente suggerito dall'esigenza di tracciare le divisioni corrispondenti alle ore nelle meridiane solari (cfr. [Neugebauer, ESA], p. 265); abbiamo già visto come il problema della quadratura del cerchio fosse connesso al bisogno di calcolare le funzioni trigonometriche, essenziali in topografia e in astronomia. Quanto al problema della duplicazione del cubo, vedremo nel §4.6 che la sua soluzione era necessaria, tra l'altro, per calibrare le catapulte.

[131] [Fraser], vol. I, p. 425.

E Geymonat:

> Nel caso particolare di Archimede va senza dubbio tenuto presente il permanere in lui, accanto a un'eccezionale genialità tecnica, di un atteggiamento filosofico inconciliabile con essa.[132]

Da cosa erano stati dedotti sentimenti intimi e opinioni inespresse di Archimede? Fraser, Geymonat e i tanti altri che hanno condiviso lo stesso atteggiamento hanno ricavato le opinioni e i sentimenti di Archimede soprattutto da una frase delle *Vite parallele* di Plutarco.[133] L'atteggiamento filosofico dello scienziato è stato dedotto cioè dall'opinione di un poligrafo di successo che accenna incidentalmente all'argomento scrivendo più di tre secoli dopo la sua morte. Plutarco, che vive in un clima culturale molto lontano da quello del III secolo a.C., pensa evidentemente di rendere un omaggio ad Archimede attribuendogli l'atteggiamento verso la tecnologia diffuso tra i suoi lettori.[134]

Furono proprio autori come Plutarco (che, di origine greca, percorse una brillante carriera al servizio dei Romani) a creare il mito di una civiltà "grecoromana" omogenea, scrivendo opere come le *Vite parallele*,[135] ed è proprio questo mito, straordinariamente resistente, che ha fatto credere a molti che le opinioni di Archimede sulla tecnologia potessero essere dedotte dalla lettura di opere di epoca imperiale.[136]

[132] [Geymonat], vol.I, p. 253.

[133] Geymonat, subito dopo il brano citato, afferma: "Ce lo dice Plutarco, allorché – dopo aver parlato dei prodigi compiuti dall'ingegneria di Archimede – elogia la nobiltà del suo ingegno che rifiutò di comporre trattati riguardanti la meccanica o altre questioni pratiche". Anche Fraser fa seguire la sua affermazione dal solito riferimento a Plutarco. Osserviamo che Archimede non solo scrisse dei "trattati riguardanti la meccanica", ma scrisse i trattati nei quali è nata la scienza della meccanica.

[134] Cfr. avanti, §8.2.

[135] Plutarco, scrivendo una serie di biografie in cui a ogni personaggio greco corrisponde un "parallelo" romano, non scrisse la biografia di alcuno scienziato, di cui non avrebbe potuto certo trovare "paralleli" a Roma. Le affermazioni di Plutarco su Archimede cui alludono Geymonat e Fraser sono nella *Vita di Marcello* (xvii, 3-4), nella biografia, cioè, del comandante dei Romani che rasero al suolo Siracusa e uccisero Archimede.

[136] Un'affermazione analoga a quella di Plutarco, secondo la quale Archimede avrebbe evitato di scrivere opere su argomenti applicativi, considerandoli poco degni, è attribuita a Carpo di Antiochia da Pappo, *Collezione*, VIII, 1026, 9-12 (ed. Hultsch). Dalla scarsità di libri in proposito dovremmo dedurre che anche gli scienziati contemporanei considerino le applicazioni di interesse economico e militare indegne di essere divulgate.

4. La tecnologia scientifica

In questo capitolo cercheremo di verificare nel caso della civiltà ellenistica la relazione individuata a livello teorico tra scienza esatta e tecnologia scientifica. Le conseguenze della nuova tecnologia sulla produzione e sull'economia saranno esaminate nel sesto capitolo.

4.1. *Ingegneria meccanica*

Gli anonimi *Laterculi Alexandrini* (probabilmente del II secolo a.C.), ritrovati in un papiro, contengono un elenco degli uomini che avevano raggiunto il vertice della fama in vari campi. Le categorie considerate sono quelle dei legislatori, pittori, scultori, architetti e meccanici. La scelta di questi settori mostra un interesse per la tecnologia che è stato a lungo negato per tutto il "mondo classico". [1] La selezione è così severa che tra gli scultori sono nominati solo Fidia, Scopas, Prassitele, Mirone e Policleto. [2] Si tratta evidentemente di un "canone", che intende consacrare i vertici assoluti del genio umano, dello stesso tipo del famoso elenco delle sette meraviglie del mondo. Tra i meccanici è nominato Abdaraxo, "costruttore delle macchine di Alessandria". [3] Doveva trattarsi di macchine all'epoca così famose che l'autore dei *Laterculi Alexandrini* aveva giudicato inutile qualsiasi ulteriore specificazione. Eppure non abbiamo alcuna altra fonte

[1] Fraser osserva che l'inserimento di "meccanici" in questa lista "is of importance as showing the rather unexpected interest taken in such engineers and as indicative perhaps of a new prestige acquired by them" ([Fraser], vol. I, p. 426).

[2] [Fraser], vol. I, p. 456.

[3] La lista dei meccanici, con brevi cenni sulle loro realizzazioni, contenuta nei *Laterculi Alexandrini* è riportata in [Fraser], vol. IIa, p. 617.

che abbia tramandato il nome di Abdaraxo, né fornito alcun indizio per capire a quali macchine si riferisca il passo.[4]

Questo esempio suggerisce che la scarsità di notizie sull'ingegneria meccanica ellenistica possa dipendere non da disinteresse degli scrittori del III e del II secolo a.C., ma dalla selezione delle fonti effettuata in età imperiale e medievale, epoche di spiccato disinteresse per la tecnologia.

Nonostante il silenzio quasi assoluto delle fonti, le poche informazioni disponibili permettono di renderci conto del fatto (non sorprendente) che la nascita della scienza della *meccanica* (cioè della *scienza delle macchine*) fu accompagnata dallo sviluppo della capacità di progettare e realizzare una gran quantità di macchine. All'inizio dell'età ellenistica vi furono almeno due novità: anzitutto si cominciarono a usare una serie di nuovi elementi tecnologici di base, come viti e ruote dentate; inoltre la possibilità di calcolare teoricamente i vantaggi meccanici stimolò la progettazione e la costruzione di macchine composte con vantaggio elevato.

Anche se progenitori delle viti, come il "succhiello" per forare il legno, erano certamente molto più antichi, l'uso di viti cilindriche con madrevite non è attestato prima dell'età ellenistica.[5] Erone descrive due metodi di costruzione: il metodo più semplice consisteva nell'avvolgere attorno a un cilindro un foglio metallico a forma di triangolo rettangolo, con un cateto parallelo all'asse del cilindro; il bordo del foglio metallico che costituiva l'ipotenusa del triangolo assumeva così la forma di un'elica cilindrica e serviva da guida per la realizzazione della scanalatura.[6] Il secondo sistema è basato sull'uso di una filettatrice automatica ed è descritto purtroppo in modo non del tutto chiaro nel testo arabo rimastoci.[7] Entrambi i sistemi sono basati su una "progettazione scientifica", senza la quale non possono essere realizzate viti di precisione. Mentre oggetti con la stessa forma vennero usati, come vedremo, a diversi scopi, si studiarono anche le proprietà teoriche delle eliche cilindriche. Queste curve furono studiate nell'opera perduta di Apollonio di Perga Περὶ τοῦ κοχλίου (*Sulla coclea*). Proclo riferisce che Apollonio aveva dimostrato in particolare che l'elica cilindrica è una curva *omeomerica*: dati cioè due qualsiasi suoi punti, P e Q, esiste un movimento rigido che manda P in Q lasciando in-

[4] Non vi sono motivi per affermare che si tratti necessariamente di macchine belliche, come in genere si è supposto.

[5] Viti cilindriche con madreviti sono attestate nei torchi (per la cui datazione cfr. il prossimo §5.3).

[6] Erone, *Meccanica*, II, i, 5.

[7] Erone, *Meccanica*, III, ii, 21.

variata la curva [8]; in altre parole la curva può "scorrere su se stessa" rimanendo invariata in forma. È proprio questa, naturalmente, la proprietà che rende utili le eliche cilindriche per costruire viti con madreviti.

Sembra che anche la ruota dentata sia stata realizzata per la prima volta all'inizio dell'età ellenistica. [9] Si tratta di un dispositivo che dette all'ingegneria molte possibilità nuove: da quella di trasferire un moto di rotazione da un asse a un altro ortogonale alla costruzione di ingranaggi demoltiplicatori con vari usi, tra i quali la realizzazione di macchine con vantaggio elevato. Gli ingranaggi demoltiplicatori che ancora oggi usiamo in tante circostanze, dai cambi delle biciclette ai congegni a orologeria, sono i diretti discendenti dei meccanismi alessandrini, recuperati attraverso lo studio arabo e rinascimentale di antiche opere, soprattutto quelle di Erone di Alessandria; non si tratta di oggetti imposti dalla natura o dalla logica, come molti mostrano di credere, ma di prodotti culturali che abbiamo ereditato dalla civiltà ellenistica.

4.2. *Strumentazione*

I reperti archeologici e le descrizioni sopravvissute sono così rari che non possiamo sperare di conoscere una parte significativa degli strumenti di misura ellenistici. Abbiamo però informazioni sufficienti per farci un'idea del livello qualitativo della tecnologia usata. Accenneremo a questo scopo a due sole categorie di strumenti di misura: gli strumenti per il rilevamento e gli orologi.

Strumenti per il rilevamento. Il principale strumento per il rilevamento dell'Egitto faraonico era stato la groma (consistente in due assi di legno fissati ortogonalmente), che permetteva di individuare linee ortogonali e passò praticamente inalterata ai Greci dell'età classica e ai Romani. La differenza tra tecnologia prescientifica e tecnologia scientifica è bene illustrata dal confronto tra la groma e uno strumento ellenistico che può essere usato allo stesso scopo: la diottra descritta da Erone. [10] Le linee ad angolo retto sono in questo caso tracciate su un disco gra-

[8] Proclo, *In primum Euclidis Elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 105, 1-6.

[9] La prima documentazione di ingranaggi (con ruote dentate e cremagliere) risale al III secolo a.C. e riguarda l'orologio di Ctesibio e alcune macchine progettate da Archimede. Cfr. [Drachmann MTGRA], pp. 200-203; [Price gears], p. 53. In epoca ellenistica, come vedremo, le ruote dentate furono usate, tra l'altro, anche in macchine per il sollevamento dell'acqua e mulini idraulici.

[10] Erone, *Dioptra*.

duato; un asse, alle cui estremità vi sono due fessure attraverso cui si può traguardare, è libero di ruotare, nel piano del disco, attorno al suo centro. Il disco, oltre a girare liberamente intorno al centro, è fissato ortogonalmente a un semicerchio dentato di ottone, che può ruotare attorno a un asse orizzontale; la regolazione fine e il fermo in ogni posizione sono assicurati da una vite senza fine. Tutto il dispositivo finora descritto è incastrato con tre perni su un cilindro verticale che può ruotare a sua volta intorno al proprio asse; anche in questo caso la regolazione fine e il fermo sono assicurati da una vite senza fine, che ingrana con una ruota dentata coassiale al cilindro. Erone accenna a vari usi della diottra, in particolare per misure astronomiche e per i rilevamenti necessari allo scavo di gallerie. Purtroppo la descrizione che abbiamo è incompleta e non sappiamo se nella parte mancante fossero descritte altre parti importanti dello strumento.

Erone nella *Dioptra* descrive anche una livella ad acqua, formata da un'asta di legno orizzontale lunga circa due metri, contenente al suo interno un tubo con le estremità rivolte verso l'alto, alle quali si applicavano due tubi di vetro verticali. Quando lo strumento veniva riempito d'acqua, per il principio dei vasi comunicanti, nei due tubi di vetro l'acqua raggiungeva la stessa altezza. Ai tubi erano fissate delle piastrine di ottone scorrevoli e fissabili (con viti) al livello del pelo dell'acqua. Ciascuna piastrina era dotata di una fessura attraverso cui si poteva traguardare.

Strumenti come questi appena descritti sono incompatibili con l'idea diffusa di un progresso pressoché continuo e di una tecnologia classica primitiva. Gli storici della tecnologia che, convinti di tale idea, hanno avuto l'occasione di studiare la diottra di Erone si sono resi conto che vi doveva essere un errore; l'hanno però attribuito in genere a Erone stesso, che avrebbe dimenticato di adeguare i propri progetti all'epoca in cui gli era toccato di vivere. Nell'autorevole *History of Technology* curata da Singer et al., ad esempio, è scritto:

> La diottra di Erone resta unica, senza passato e senza avvenire: un'invenzione pregevole ma prematura, la cui complessità oltrepassava le risorse tecniche dell'epoca. [11]

Orologi. Il principale strumento ellenistico per la misura del tempo fu l'orologio ad acqua. L'antenato di questo strumento

[11] [Price strumenti], p. 610. In realtà all'epoca di Erone la diottra aveva già una storia plurisecolare, come risulta anche dalla lettura dell' *Almagesto* (cfr. avanti, p. 146, n. 123). Nel futuro della diottra vi sarà, se non altro, il teodolite, nato nel XVI secolo dallo studio dell'opera di Erone.

era la clessidra ad acqua dell'Egitto faraonico, che consisteva semplicemente in un vaso con un forellino sul fondo. Il tempo trascorso dal momento del riempimento del vaso poteva dedursi dal livello dell'acqua; a questo scopo all'interno del vaso era disegnata una scala. È stata trovata una clessidra di questo tipo risalente a circa il 1400 a.C.[12] Un oggetto del genere poteva dare un'idea del trascorrere del tempo, soprattutto di notte, ma non si può dire che fosse un vero strumento di misura. Una misura del tempo non può infatti ottenersi in questo modo per due motivi: anzitutto la velocità di efflusso dell'acqua dipende dalla pressione e quindi diminuisce durante il funzionamento, al calare del livello dell'acqua nel vaso; inoltre il diametro del forellino non può considerarsi costante che per brevi periodi di tempo, a causa della corrosione e dei depositi che tendono a ostruirlo. Alla prima difficoltà gli Egiziani avevano posto parziale rimedio usando vasi non cilindrici ma tronco-conici; si trattava tuttavia di una correzione empirica e qualitativa. Va detto infine che un'ulteriore complicazione era procurata dall'unità di misura di tempo allora usata, l'ora, che essendo definita come la dodicesima parte dell'intervallo tra alba e tramonto (o viceversa) aveva una durata variabile di giorno in giorno (e tra il giorno e la notte).

La Grecia classica non apportò miglioramenti essenziali alla clessidra ad acqua egiziana. Sembra infatti che sia l' "orologio ad acqua" trovato nell'agorà di Atene che quello usato nei processi e menzionato da Aristotele[13] fossero ancora clessidre dello stesso tipo.

I primi veri orologi sorgono ad Alessandria nella prima metà del III secolo a.C., grazie a Ctesibio,[14] che trasformò l'antica clessidra in un vero strumento di misura. Sappiamo da Vitruvio che Ctesibio aveva risolto in modo brillante tutti i problemi prima accennati.[15] Il serbatoio dell'acqua era dotato di due fori: uno più piccolo sul fondo e uno maggiore sulla parete; il serbatoio era rifornito d'acqua con continuità con un flusso intermedio alla portata dei due fori; il livello dell'acqua era così sempre pari all'altezza del foro maggiore e quindi la pressione era costante.[16] Il foro minore era praticato nell'oro o in una gemma, per evitare corrosioni e incrostazioni. La quantità d'ac-

[12] Cfr., ad esempio, [Leach], p. 123.
[13] Aristotele, *Atheniensium respublica*, lxvii, 2-3.
[14] Cfr. sopra, §3.6.
[15] Vitruvio, *De architectura*, IX, viii; 2-14.
[16] Questa soluzione tecnica suggerisce che il concetto di pressione idrostatica dipendente dall'altezza del liquido (che abbiamo trovato nel primo postulato del trattato *Sui galleggianti* di Archimede; cfr. p. 95) fosse già chiaro a Ctesibio.

qua che defluiva dal foro minore era raccolta in un secondo recipiente e misurata mediante un galleggiante che, attraverso un ingranaggio, azionava una lancetta o un indice che puntava a una scala graduata. [17] In uno dei modelli le scale erano riportate su un cilindro girevole che ruotando adattava ogni giorno la taratura dello strumento alla durata variabile delle ore.

Diversi scienziati, tra i quali forse lo stesso Archimede [18] e certamente, secoli dopo, Erone, [19] avevano scritto trattati sugli orologi. Sappiamo che tra le cause di errore era stata considerata anche la variazione di densità dell'acqua provocata dai cambiamenti di temperatura. [20]

Sono state scritte molte pagine sulla trasformazione del concetto di tempo avvenuta in età moderna a causa degli orologi, [21] ma in genere non si è supposto che qualche precedente del moderno concetto scientifico di tempo potesse risalire agli scienziati cui dobbiamo l'invenzione degli orologi. Ad esempio Sambursky non solo parla della "incapacità [degli antichi scienziati] di comprendere il tempo come variabile indipendente", [22] ma afferma anche:

> L'opera di Galileo fu rivoluzionaria [anche] perché considerava il tempo come una grandezza matematica che poteva venire usata nei calcoli [...]. Le sue dimostrazioni sono accompagnate da grafici che rappresentano porzioni di tempo come segmenti di retta. Il passo compiuto da Galileo col rappresentare il tempo in forma geometrica ha un'importanza storica di prim'ordine. [23]

In realtà l'uso della variabile indipendente tempo, rappresentata in forma geometrica, aveva permesso agli scienziati ellenistici di definire molte curve con metodo cinematico. Archimede nel trattato *Sulle spirali* (ignorato da Sambursky, ma studiato con cura da Galileo) considera esplicitamente l' "asse dei tempi" e lo usa come uno degli enti geometrici fondamentali. La variabile indipendente tempo svolge un ruolo essenziale

[17] Come la diottra descritta da Erone, anche gli ingranaggi costruiti da Ctesibio sono considerati "prematuri" da Price ([Price gears], p. 53).

[18] Una sua opera sugli orologi è citata da autori arabi. Cfr., ad esempio, [Dijksterhuis Archimede], p. 37.

[19] Un frammento del trattato di Erone sugli orologi ad acqua è in [Heronis OO], vol.1, p. 456.

[20] Cfr. Ateneo, *Deipnosophistae*, II, 42A-B.

[21] Ricordiamo solo le classiche pagine di Marc Bloch sulla concezione del tempo dell'uomo medievale ([Bloch SF], pp. 91-93) e il saggio di A. Koyré ([Koyré MPUP]).

[22] [Sambursky], p. 194.

[23] [Sambursky], p. 248. Il libro di Sambursky non può essere ignorato perché è l'unico, a mia conoscenza, dedicato alla "fisica" dei Greci (il più delle volte considerata inesistente).

anche nell' *Almagesto* e, per fare un solo altro esempio, interessanti considerazioni su questo argomento sono esposte da Erone sia nella *Pneumatica* sia nella *Meccanica*, come vedremo più avanti.

L'uso degli orologi modificò anche il concetto di tempo nella vita di ogni giorno? Un indizio che già nel IV secolo ci si muovesse in questa direzione, oltre che dalla misura del tempo durante i processi, che abbiamo già ricordato, è fornito dalla cortigiana Metica, che concedeva i propri favori ai clienti per un tempo prefissato, cronometrandone la durata con un orologio ad acqua.[24]

4.3. *Tecniche di navigazione*

La civiltà ellenistica fu, ancor più di quella ellenica, la civiltà di un gruppo di città portuali in comunicazione tra loro via mare. Essenziali quindi, per l'economia dell'epoca, erano le tecniche di navigazione. Tali tecniche avevano qualche relazione con la scienza?

Per navigare in mare aperto, più della conoscenza approssimata dei punti cardinali ottenibile nel caso di cielo coperto con una bussola, è essenziale avere:

- Un sistema di coordinate, cioè una teoria scientifica della geografia.
- Delle carte nautiche attendibili.
- Un sistema per "fare il punto", cioè per determinare la posizione della nave rispetto al sistema di coordinate.

Con questi strumenti teorici si possono correggere gli errori di rotta dovuti all'impossibilità di riconoscere i punti cardinali nelle notti senza stelle. Se invece si usa una bussola senza saper determinare la posizione della nave, gli inevitabili errori, sommandosi senza correzione, finiranno sempre con il portare la nave fuori rotta. La determinazione dei punti cardinali con una bussola, oltre ad essere affetta da rilevanti errori di misura accidentali, è anche viziata dalle irregolarità del campo magnetico terrestre (che stupirono Colombo). L'utilità della bussola, che non aveva consentito lunghi viaggi in mare aperto prima del XV secolo, consiste nel ridurre l'ampiezza delle correzioni di rotta, che sono comunque necessarie e impossibili senza gli strumenti teorici prima elencati.

Il sistema delle coordinate sferiche fu recuperato quando, nel XV secolo, arrivò in Occidente una copia della *Geografia*

[24] Cfr. Ateneo, *Deipnosophistae*, XIII, 567c-d.

di Tolomeo. Altri manoscritti che descrivevano la costruzione e l'uso di strumenti ellenistici, quali l'astrolabio piano,[25] permisero ai marinai di determinare la latitudine in mare aperto con osservazioni astronomiche.[26]

Le circostanze precedenti non sono state sufficienti a insinuare il dubbio che il popolo di marinai che aveva creato la geometria (e la trigonometria) sferica, l'astronomia e la geografia matematica, la cartografia e l'astrolabio piano avesse saputo usarli per la navigazione.[27] Fino a qualche tempo fa si credeva infatti che gli "Antichi" navigassero in vista della costa solo perché questa era la tecnica usata nel Medio Evo (quando si erano perdute tutte le teorie scientifiche prima elencate).

Eppure la letteratura non solo lascia trapelare un ricordo dei viaggi oceanici ellenistici da racconti fantastici (ad esempio nella *Storia vera* di Luciano[28] o nella epitome di Fozio del romanzo *Le meraviglie di là da Tule* di Antonio Diogene[29]), ma contiene anche resoconti di alcuni di tali viaggi, come quelli di Eudosso di Cizico, che navigò più volte tra Egitto e India non costeggiando ma seguendo una rotta diretta dal golfo di Aden,[30] o il viaggio di esplorazione nell'Atlantico del Nord del greco di Marsiglia Pitea (nella prima metà del III secolo a.C.),

[25] Che l'astrolabio piano fosse uno strumento ellenistico noto a Tolomeo è stato dimostrato in [Neugebauer EHA].

[26] Misurare la longitudine è molto più difficile, ma in mancanza si può navigare in mare aperto "speronando la latitudine", come dicevano i navigatori portoghesi, raggiungendo cioè la latitudine del porto d'arrivo e navigando sul parallelo fino a raggiungerlo.

[27] La connessione dell'astronomia greca con le tecniche di navigazione è chiara sin dai suoi primordi prescientifici; la prima opera "astronomica" di cui abbiamo notizia è infatti l' *Astrologia nautica* attribuita da Simplicio a Talete (Simplicio, *In Arist. phys.*, [CAG], vol. X, 23, 29) e da Diogene Laerzio a Foco di Samo (Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, I, 23).

[28] Il racconto di Luciano si presenta come un divertente e grottesco cumulo di evidenti falsità proprio perché non si tratta di una pura opera di fantasia, ma (come chiarito dall'autore) di una satira di resoconti di viaggi considerati inattendibili. Possiamo quindi esser certi che alcuni elementi del racconto fossero presenti in opere con pretese di realismo. Sappiamo, d'altra parte, che all'epoca di Luciano non si credeva più neppure al viaggio di Pitea, del quale parleremo tra poco.

[29] Secondo Fozio, il protagonista del romanzo naviga dall' *Oceano scitico* all'*Oceano orientale* e di qui, costeggiando il *mare esterno*, giunge a Tule (isola dell'Atlantico del Nord; Pitea con questo nome intendeva probabilmente l'Islanda; la Tule di Tolomeo è stata identificata con le Shetland; cfr. [Toomer: *Almagesto*], p. 89).

[30] Questi viaggi, risalenti all'epoca di Evergete II, erano stati narrati da Posidonio e sono riferiti in Strabone, *Geografia*, II, iii, 4. In questo periodo l'interesse dei Tolomei per la navigazione nell'Oceano Indiano è eloquentemente dimostrato dalla nomina, verso la fine del II secolo a.C., di un funzionario reale ἐπὶ τῆς Ἐρυθρᾶς καὶ Ἰνδικῆς θαλάσσης, cioè preposto al Mar Rosso e all'Oceano Indiano (cfr. [Rostovzev SESME] , vol. II, p. 362).

che lo descrisse nel suo libro Περὶ Ὠκεανοῦ.[31] Viaggi nell'Atlantico, verso occidente, sono riferiti da Diodoro Siculo, Plutarco e altri.[32]

I viaggi in mare aperto si avvalevano certamente degli strumenti teorici prima citati. Ma la scienza forniva ai marinai anche prodotti tecnologici utili? Potrebbe non essere un caso che Pitea, l'esploratore dell'Atlantico del Nord, fosse un greco di Marsiglia, cioè di una città ricordata da Strabone come anticamente famosa per la costruzione di strumenti utili alla navigazione.[33] Strabone riferisce anche che a Marsiglia e a Cizico, come a Rodi, il segreto sulle arti meccaniche era osservato con particolare cura[34]; questa notizia può spiegare in parte la nostra mancanza di informazioni sull'argomento.

Un'altra applicazione della tecnologia alla navigazione fu la riattivazione, verso il 275 a.C., dell'antico canale (scavato per la prima volta nel VII secolo a.C.) che collegava il Mediterraneo al Mar Rosso. In epoca imperiale non era più agibile e, come è ben noto, per recuperare la possibilità di navigare da un mare all'altro bisognò attendere circa due millenni.

4.4. *Ingegneria navale. Il Faro*

Sulle tecniche di costruzione navale si sa poco.[35] Si sa però che nel III secolo a.C. vi furono in questo settore dei radicali cambiamenti. In epoca classica si erano usate navi chiamate biremi, triremi e quadriremi, ma non si è certi del significato di questi termini: alcuni hanno pensato che si riferissero al numero degli addetti a ciascun remo, mentre altri hanno creduto che si trattasse di navi con, rispettivamente, due, tre o quattro

[31] Sappiamo da alcuni frammenti riferiti da Strabone (*Geografia*, I, iv, 2-3; II, iv, 1) che Pitea aveva raggiunto località dove il giorno durava sei mesi (evidentemente al di là del circolo polare) e che conosceva l'*Oceano congelato* (cioè evidentemente la banchisa polare). Strabone rimprovera Eratostene per avere usato dati del libro di Pitea, da lui considerato un bugiardo. In epoca moderna si è verificata l'attendibilità di Pitea proprio in base ai frammenti riferiti da Strabone (cfr., ad esempio, [Heiberg GMNA], p. 83, n.5).

[32] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, V, xix-xx; Plutarco, *Vita di Sertorio*, viii. Diodoro Siculo parla di una grande isola, a molti giorni di navigazione verso occidente, con montagne e fiumi navigabili. I Cartaginesi vi avrebbero fondato una colonia e avrebbero pensato di trasferirvisi in massa in caso di grave pericolo per la loro città. Diverse testimonianze su viaggi nell'Atlantico sono ora raccolte e discusse in [Manfredi].

[33] Strabone, *Geografia*, IV, i, 5.

[34] Strabone, *Geografia*, XIV, ii, 5.

[35] Un libro di piacevole lettura sulla storia antica delle navi e della navigazione, che contiene anche un'aggiornata bibliografia, è [Casson].

ordini sovrapposti di rematori. In epoca ellenistica appaiono però improvvisamente 20-remi, 40-remi e nomi composti con numeri ancora maggiori. Nonostante alcuni volenterosi tentativi di descrivere incredibili concentrazioni di rematori, l'aumento esplosivo dei numeri in gioco sembra difficilmente compatibile con le interpretazioni precedenti. Si può forse sospettare che la terminologia fosse divenuta convenzionale. L'unica cosa certa è che questi nuovi termini indicavano navi molto più grandi delle precedenti e questo aumento improvviso e drastico delle dimensioni indica mutamenti qualitativi nella tecnologia costruttiva. Anche le navi da guerra divennero improvvisamente molto più grandi. Sembra che le *catafratte* (cioè *corazzate*) usate da Antigono II di Macedonia nella battaglia navale di Coo contro Tolomeo II Filadelfo (circa 260 a. C.) avessero le dimensioni di quindici quadriremi. Si sa di navi civili molto più grandi, come la *Siracusia*, fatta costruire da Gerone II di Siracusa.[36]

Non sono stati trovati relitti di queste navi enormi. Nel 1954 fu però rinvenuta al largo di Marsiglia una nave ellenistica molto più piccola (di circa 33 metri), della metà del III secolo a.C. Lo storico della tecnologia navale Lethbridge scrive a proposito di questa nave:

> Con navi del genere i Cartaginesi o i Greci avrebbero potuto raggiungere non soltanto le Azzorre, ma anche le Americhe. Una volta compreso che la terra è sferica è probabile che essi abbiano cercato di circumnavigarla.[37]

Lo scafo era foderato di piombo, che lo metteva al riparo dalla teredine, mollusco dal quale le navi inglesi e olandesi del XVIII secolo non potevano difendersi.

L'introduzione del piombo nella costruzione di navi può essere connessa alla nascita dell'idrostatica, attestata appunto nella civiltà ellenistica del III secolo a.C. Non si rischia infatti di affondare una nave al momento del varo, per averla rivestita di piombo capovolgendo una tradizione millenaria, se non si sanno calcolare teoricamente le linee di galleggiamento, come abbiamo visto fare ad Archimede nel suo trattato *Sui galleggian-*

[36] Ampi stralci di un'opera scritta da Moschione su questa nave sono riportati in Ateneo, *Deipnosophistae*, V, 206-209. Sappiamo così che la nave, per la cui costruzione era stato impiegato legno sufficiente per sessanta quadriremi, aveva a bordo, tra l'altro, una palestra, una biblioteca, giardini pensili e venti stalle per cavalli. Subito prima della *Siracusia*, Ateneo aveva descritto altre navi, di dimensioni confrontabili, costruite ad Alessandria dai Tolomei.

[37] [Lethbridge], p. 578. Tentativi di circumnavigazione sono in effetti riferiti da Strabone (*Geografia*, I, i, 8).

ti.[38] Un discorso analogo vale per le dimensioni. Le catafratte, secondo Lethbridge, dovevano avere grosso modo la grandezza delle navi di linea del periodo napoleonico. Questo confronto fa ricordare che le navi del periodo napoleonico erano progettate da ingegneri laureati all'Ecole Polytechnique. Sembra difficile moltiplicare improvvisamente le dimensioni delle navi per quindici o per sessanta senza l'ausilio di strumenti teorici. Fu probabilmente proprio la nuova possibilità di una "progettazione teorica", basata in particolare sulle teorie della meccanica e dell'idrostatica, a portare l'ingegneria navale a un livello che, almeno per quanto riguarda le dimensioni e la foderatura dello scafo, è stato recuperato solo nel XIX secolo. Del resto la relazione tra la scienza e la costruzione di queste navi è documentata in almeno un caso: sappiamo da Ateneo che Archia di Corinto, l'ingegnere che costruì per Gerone II di Siracusa la gigantesca nave *Siracusia* cui abbiamo già accennato (nave che era anch'essa rivestita di piombo[39]), si avvalse per tale costruzione della supervisione di Archimede.[40]

Vorremmo sapere di più su queste enormi navi ellenistiche. Sappiamo che a Rodi era prevista la pena di morte per chi spiasse nei cantieri navali[41] e che sulle navi della flotta rodia vi erano molti addetti ai servizi tecnici, alcuni dei quali avevano un alto grado gerarchico, ma non sappiamo né quali segreti fossero custoditi nei cantieri né le mansioni dei tecnici navali. Un'iscrizione dedicatoria, che elenca i membri dell'equipaggio di una nave rodia, nomina, tra gli altri, dieci ἐργαζόμενοι (un termine non tradizionalmente marinaresco, usato per diverse categorie di operai), il cui compito non è chiaro, e un ἐλαιοχρηίστας cioè un addetto alla lubrificazione.[42]

Un'applicazione della tecnologia ellenistica alla navigazione fu la costruzione ad Alessandria, verso il 280 a. C., del Faro. L'altezza totale era di circa 95 metri. Un primo piano, a base quadrata, giungeva circa a metà altezza; poi la costruzione proseguiva a pianta ottagonale e alla sommità vi era un contenitore

[38] Poiché al tempo della battaglia di Coo (circa 260 a.C.) Archimede era molto giovane (egli aveva settantacinque anni, secondo l'erudito bizantino Tzetzes, quando fu ucciso, nel 212) e d'altra parte la progettazione delle enormi catafratte usate da Antigono appare probabilmente basata su conoscenze di idrostatica, abbiamo un altro indizio (oltre a quello fornito dall'orologio di Ctesibio; cfr. sopra, p. 121, n. 16) che suggerisce che la nascita dell'idrostatica scientifica avesse preceduto di qualche decennio il trattato di Archimede.

[39] Ateneo, *Deipnosophistae*, V, 207a.

[40] Ateneo, *Deipnosophistae*, V, 206.

[41] Strabone, *Geografia*, XIV, ii, 5.

[42] [Clara Rhodos], VIII, pp. 228 sgg.; l'iscrizione è discussa in [Rostovzev SESME], vol. II, p. 97.

cilindrico per la lanterna, che costituiva la vera "meraviglia": la sua luce, secondo Flavio Giuseppe, era visibile a una distanza di circa 300 stadi (ossia 48 km).[43] Il dato riferito da Flavio Giuseppe è attendibile perché corrisponde approssimativamente alla distanza dell'orizzonte[44] e si deve pensare che, come per i fari moderni, il limite della visibilità fosse determinato dall'altezza dell'edificio, giacché altrimenti una struttura così alta sarebbe stata inutile. Per rendere visibile la luce della lanterna così lontano sembra necessario un riflettore, la cui esistenza è d'altra parte certa, poiché alcuni storici arabi parlano di superfici metalliche riflettenti ancora esistenti alla loro epoca.[45]

L'istallazione del Faro fu considerata così utile che sorsero dei "fari" in tutti i porti importanti del Mediterraneo ellenizzato. Le fonti greche non contengono però né una descrizione globale né alcun dettaglio tecnologico relativo a quest'opera, che pure i contemporanei avevano incluso tra le sette meraviglie del mondo. È una conferma della riservatezza delle fonti sui prodotti tecnologici, in un caso in cui non si può dubitare dell'esistenza del prodotto. Poiché le sole descrizioni rimasteci del Faro risalgono a storici arabi che lo visitarono quando da tempo non era più in funzione, sappiamo ben poco sulla tecnologia usata. Non conosciamo, ad esempio, il sistema usato per l'illuminazione. Alcune caratteristiche possono però essere congetturate sulla base della destinazione dell'opera e delle conoscenze dell'epoca. Si può così immaginare che il riflettore fosse ottenuto, come si fa oggi, con uno specchio parabolico. Questa possibilità è suggerita soprattutto dal fatto che la teoria corrispondente sembra sorgere proprio all'epoca della costruzione del Faro.[46]

Anche se non è direttamente dimostrabile l'intervento di scienziati nella progettazione del Faro, non può essere casuale

[43] Flavio Giuseppe, *Bellum judaicum*, IV, 10, 613.

[44] La distanza dell'orizzonte da un punto ad altezza h è $\sqrt{2Rh}$, dove R è il raggio della Terra. Dette h e d le altezze sul livello del mare della sommità del Faro e dei marinai che dovevano avvistarlo, la lanterna sarebbe stata visibile, se sufficientemente luminosa, fino alla distanza massima $D = \sqrt{2Rh} + \sqrt{2Rd}$. Assumendo h=100 m (valore che si ottiene arrotondando l'altezza del Faro, anche per tenere conto del piccolo dislivello tra la base e il mare) e scegliendo per d il valore indicativo di 15 m, si ottiene per D il valore di 49,5 km, ossia 312 stadi. Il valore dato da Flavio Giuseppe corrisponde quindi, nei limiti dell'evidente arrotondamento, alla distanza di massima visibilità in linea retta.

[45] Per una breve rassegna delle fonti arabe sul Faro cfr. [Fraser], vol.II, p. 46. Alcune fonti classiche e arabe sono riportate anche in [Clayton Price], pp. 146-148 e 200-203. Secondo Clayton e Price dalle fonti si deduce che il fuoco era alla base del faro e alla sommità della torre vi erano solo gli specchi (*op. cit.*, p. 139). La struttura principale del Faro era ancora in piedi nel XIV secolo, quando andò in rovina in seguito a una serie di terremoti.

[46] La scarsità di fonti non permette di documentare questa affermazione con la precisione desiderabile. Sappiamo però che la teoria delle coniche e l'ottica si

che il primo riflettore della storia sia sorto ad Alessandria nella prima metà del III secolo a.C., proprio cioè dove e quando per la prima volta vi furono scienziati interessati sia alla teoria delle coniche che alla catottrica, che era appunto la "teoria scientifica" elaborata per progettare oggetti del genere. Osserviamo che, nonostante un resistente luogo comune attribuisca a Keplero la prima applicazione della teoria classica delle coniche, in realtà le coniche, oltre che alla catottrica, avevano avuto diverse altre applicazioni, tra l'altro alla cartografia.[47]

Poiché una luce mandata in una direzione fissa non è molto utile per orientare le navi, si può supporre che la lanterna del Faro (o il riflettore) fosse girevole. Ciò spiegherebbe anche la forma cilindrica del contenitore, che è ripetuta in tutti gli altri fari di cui si ha notizia.

Nel Medio Evo si perse, insieme alla catottrica, anche la capacità di costruire fari e si cercò al più di continuare a usare qualcuno di quelli sopravvissuti. Si riprese a costruire fari nel XII secolo (Genova ebbe un faro nel 1139), ma si trattava di vani tentativi di imitare quelli antichi. Lo storico della tecnologia R.G. Goodchild scrive:

> soltanto alla fine del diciassettesimo secolo venne seriamente intrapresa la costruzione dei fari secondo schemi nuovi e originali che avrebbero condotto ai moderni tipi di struttura.[48]

Gli *schemi nuovi e originali* consistevano nell'uso di riflettori basati sulla teoria delle coniche. Quanto alla data fornita, essa sarebbe deducibile approssimativamente anche senza le documentazioni esistenti sui fari moderni. Basta sapere che parte dell'antica teoria delle sezioni coniche (comprendente la conoscenza della proprietà focale della parabola) fu recuperata nella prima metà del XVII secolo (in particolare da Bonaventura Cavalieri[49]) e tener conto del tempo occorrente per su-

erano sviluppate (in particolare nei lavori di Euclide) alla fine del IV secolo e che la teoria delle coniche era stata applicata alla catottrica. Uno specchio ustore non è altro che un riflettore parabolico applicato "a rovescio", usando il principio di reversibilità del cammino ottico. Poiché la proprietà focale della parabola era stata applicata alla costruzione di specchi ustori intorno alla metà del III secolo (come sappiamo dai riferimenti di Diocle a Dositeo; cfr. p. 84 e n. 23) e, d'altra parte, la reversibilità del cammino ottico era nota ad Archimede (cfr. pp. 84-85 e n. 30), la progettazione di riflettori parabolici era divenuta certamente possibile entro la prima metà del III secolo. Poiché il Faro fu costruito verso il 280, in realtà la progettazione dei riflettori precedette probabilmente quella degli specchi ustori.

[47] Come ricordato nel §3.3, tali applicazioni sono usate nella *Geografia* di Tolomeo.

[48] [Goodchild], pp. 530-531.

[49] In *Lo specchio ustorio overo trattato delle settioni coniche...*, Bologna, 1632. Il cap. 32 si intitola: *Come con li suddetti specchi* [cioè con gli specchi

perare i problemi tecnici connessi alla realizzazione pratica dei riflettori.

4.5. *Ingegneria idraulica e pneumatica*

Nel caso dell'ingegneria idraulica abbiamo una ricca documentazione archeologica: resti dei sistemi di approvvigionamento idrico sono stati infatti trovati in diversi siti. Gli impianti ellenistici includevano spesso condotte forzate per approvvigionare le cittadelle. A Pergamo le condutture prelevavano l'acqua su una montagna molto più alta e la convogliavano in vasche di decantazione situate a un'altezza di poco superiore a quella della cittadella; da qui l'acqua scendeva a valle e risaliva verso Pergamo in condotte forzate: a fondo valle si raggiungeva una pressione di circa 20 atmosfere. Sono stati trovati i resti di sistemi dello stesso tipo a Olinto (nella Calcidica), ad Aspendo (in Panfilia), a Smirne e in diversi altri siti.[50] Gli impianti comprendevano, tra l'altro, bacini di sedimentazione e bacini di compensazione della pressione.

Va notato che conosciamo il livello tecnologico di queste opere solo grazie ai ritrovamenti archeologici del XX secolo. Lo stretto legame tra le realizzazioni dell'ingegneria idraulica ellenistica e lo sviluppo delle scienze dell'idrostatica e della pneumatica è evidente.

Vitruvio riferisce ancora diversi problemi relativi alla costruzione di condotte forzate,[51] ma queste divennero rare in età imperiale. Anche a Pergamo i Romani sostituirono la condotta forzata con un acquedotto a cielo aperto e l'acqua non poté più raggiungere la cittadella.

Un'esigenza molto sentita in Egitto, che riguardava sia l'ingegneria idraulica che quella meccanica, era la costruzione di macchine per il sollevamento dell'acqua.

Nell'Egitto faraonico si usava lo *shaduf*, documentato da dipinti tombali risalenti a circa il 1600 a.C. e tuttora usato in molte regioni dell'Oriente.[52] Si tratta di una secchia fissata all'estremità di un'asta. L'asta è infulcrata al centro, a un'altezza di circa un metro e mezzo, e all'altra estremità è appesantita da un blocco di argilla con funzione di contrappeso. Quando la secchia è sollevata a una certa altezza, la si può svuotare in una canalina.

ustori di Archimede] *potiamo di notte mandare il lume lontano* [possiamo cioè costruire un faro].

[50] Cfr. [Bonnin], [Tölle-Kastenbein].

[51] Vitruvio, *De architectura*, VIII, vi, 5-9.

[52] Cfr., ad esempio, [Drower], p. 531.

Tra le macchine per il sollevamento dell'acqua introdotte in epoca ellenistica vi sono la *sakiyeh* e la coclea, detta anche vite di Archimede.

Nella *sakiyeh* (allora detta semplicemente μηχανή, cioè *macchina* per antonomasia) il sollevamento avviene con una catena di secchi montati lungo il bordo di una ruota verticale in modo da riempirsi e svuotarsi (in un'apposita canalina) automaticamente al girare della ruota. La ruota con i secchi è solidale a un'altra ruota coassiale più piccola, posta all'asciutto. La seconda ruota è dentata, cosicché il moto può essere trasferito da una terza ruota, orizzontale. La *sakiyeh* è documentata per la prima volta in un papiro del II secolo a.C.[53] Un salto di qualità separa questa macchina dallo *shaduf*. Non solo il flusso è quasi continuo e la quantità d'acqua sollevata può essere molto maggiore, ma, soprattutto, mentre lo *shaduf* doveva essere azionato con qualche abilità da un uomo, con il nuovo dispositivo l'azione necessaria si riduce a un moto continuo di rotazione, ottenibile facilmente con l'uso di un animale.[54]

Un'altra macchina introdotta allo stesso scopo in epoca ellenistica fu la vite di Archimede o coclea (κοχλίας). Si tratta di uno strumento ben noto, di una semplicità assolutamente geniale. Il flusso dell'acqua è in questo caso del tutto continuo e non vi è più alcun residuo dell'antichissimo uso delle secchie. L'acqua è sollevata direttamente, all'interno di un tubo inclinato, dal moto di rotazione di una superficie elicoidale interna al tubo.

Sia la *sakiyeh* che la coclea appaiono prodotti della nuova tecnologia scientifica. Si tratta infatti di macchine basate sia sui due nuovi elementi introdotti nella tecnologia meccanica, la ruota dentata e la vite, dei quali abbiamo già notato il probabile rapporto con la scienza, sia su una "progettazione teorica". La superficie elicoidale della coclea, in particolare, non sembra avere alcuna relazione né con strumenti precedenti usati allo stesso scopo, né con oggetti naturali, mentre appare un naturale oggetto di studio nell'ambito della geometria ellenistica.[55] Ciò basterebbe per farne sospettare un'origine non indipendente dal pensiero scientifico. In realtà non vi è alcun bisogno di avanzare congetture, poiché l'attribuzione della coclea ad Archimede

[53] P. Cor. 5.

[54] Filone di Bisanzio, presentando un suo dispositivo pneumatico per il sollevamento dell'acqua, ne parla come di un metodo molto migliore di quelli usuali, basati sulla trazione animale; Filone di Bisanzio, *Pneumatica*, v (ed. Prager), 84.

[55] Anche se è più tarda, è significativa a questo riguardo l'opera già ricordata di Apollonio di Perga Περὶ τοῦ κοχλίου (*Sulla coclea*), in cui si studiavano le eliche cilindriche (cfr. sopra, pp. 118-119).

è basata sulle concordi testimonianze di Diodoro Siculo[56] e di Ateneo.[57] Non esiste inoltre alcuna testimonianza su un eventuale uso della coclea (ignota nella Grecia classica) nell'Egitto pre-ellenistico, pur trattandosi di una civiltà di cui ci resta molto materiale iconografico (relativo in particolare ai lavori di idraulica necessari per la regolazione delle piene del Nilo), nel quale non si vedono mai né viti di Archimede né viti di alcun altro genere.

La tendenza a respingere nella leggenda, senza prendere neppure in considerazione le fonti, tutto ciò che riguarda Archimede è però così forte che nella principale opera sulla storia della tecnologia ([HT]) è scritto:

> Secondo la leggenda, Archimede avrebbe inventato e costruito molte macchine [...] L'unica macchina che porta il suo nome è la ben nota "vite di Archimede" per l'irrigazione, ma sembra che la leggenda gli abbia attribuito erroneamente l'invenzione di un dispositivo già da molto tempo esistente in Egitto.[58]

Un altro prodotto tecnologico della scienza ellenistica utile per il sollevamento dell'acqua è la pompa aspirante e premente. Essa era in uso nel II secolo a.C. ed è descritta da Vitruvio, che ne attribuisce l'invenzione a Ctesibio.[59] Vitruvio trae la sua descrizione direttamente dai *Commentari* (perduti) di Ctesibio, ai quali rimanda il lettore a proposito di varie altre macchine pneumatiche.[60] Si tratta di pompe simili a quelle moderne,

[56] Diodoro parla dell'uso della coclea per irrigare il Delta e ne attribuisce l'invenzione ad Archimede (*Bibliotheca historica*, I, xxxiv, 2). Diodoro ritorna sull'argomento in V, xxxvii, 3-4, a proposito dell'uso della coclea per il drenaggio delle miniere spagnole, promettendo di esporre *in dettaglio* (ἀκριβῶς) tutte le invenzioni di Archimede nei libri dedicati alla sua epoca (che non si sono conservati); l'affermazione di Diodoro indica che la sua attribuzione della coclea ad Archimede era basata sull'uso di fonti che trattavano l'argomento in dettaglio.

[57] In uno dei passi riportati da Ateneo dell'opera di Moschione sulla nave *Siracusia* si attribuisce l'invenzione della coclea ad Archimede, menzionandone l'uso per il drenaggio della *Siracusia* (Ateneo, *Deipnosophistae*, V, 208 f).

[58] [Gille macchine], p. 642. L'origine egiziana della coclea era stata respinta da Feldhaus ([Feldhaus]) e da A. Rehm, che aveva scritto: "Che la vite di Archimede [...] sia realmente invenzione dell'uomo di cui reca il nome, è attestato nella migliore maniera possibile" ([Rehm], p.146, n. 28).

[59] Vitruvio, *De architectura*, X, vii, 1-3. Una variante usata come idrante è descritta da Erone (*Pneumatica*, I, xxviii). La descrizione di una pompa aspirante contenuta nel testo arabo della *Pneumatica* di Filone di Bisanzio (cap. lxiv) sembra dovuta ad autori arabi ed è di scarso valore tecnico.

[60] Vitruvio afferma di aver descritto le sole macchine utili: orologi e pompe. Gli altri dispositivi descritti nei *Commentari* di Ctesibio sono considerati da Vitruvio particolarmente ingegnosi ma ideati a puro scopo di diletto. Mi sembra che il contenuto (che abbiamo ricordato a p. 98) dei primi capitoli della

con cilindri e pistoni. Quella descritta da Vitruvio era, in particolare, a doppio stantuffo a fasi alterne. La realizzazione della pompa era basata anche sull'introduzione di un nuovo elemento che sarà importante in tutta la tecnologia successiva: la valvola. La pompa di Ctesibio doveva avere una diffusione notevole ancora in epoca romana, giacché gli scavi archeologici ne hanno forniti diversi esemplari risalenti al primo periodo imperiale. Gli esemplari ritrovati avevano generalmente i cilindri rivestiti di piombo[61]; si tratta di un particolare molto interessante, anche perché dimostra la capacità di trattare superfici metalliche con la precisione necessaria ad assicurare l'aderenza tra cilindro e pistone, grazie anche, evidentemente, a tecniche di molatura.[62]

4.6. *La tecnologia militare*

Una conferma dello stretto rapporto tra scienza e tecnologia nella civiltà ellenistica è fornita dal salto di qualità che la nascita della scienza provocò nella tecnologia militare. Le descrizioni di Polibio[63] e di Plutarco dell'assedio di Siracusa (212 a.C.) testimoniano lo stupore e il terrore dei nemici di fronte a una "guerra tecnologica". Plutarco racconta che Archimede

> iniziò il tiro con le sue macchine, scagliando sulle forze terrestri ogni specie di dardi e di macigni [...] Alcune delle navi vennero agganciate con artigli di ferro e mediante un contrappeso sollevate e quindi colate a picco [...] Spesso si vedeva lo spettacolo pauroso di una nave sollevata in aria, fatta oscillare finché tutto l'equipaggio fosse stato scagliato via e scaraventata poi vuota contro le fortificazioni, o fatta ricadere in mare in seguito allo sgancio degli artigli.[64]

Plutarco presenta la tecnologia usata dai Siracusani come un insieme di trovate del genio isolato di Archimede; questa versione infantile, a uso dei lettori romani, appartenenti a una civiltà prescientifica, è stata in genere trasmessa acriticamente fino ai nostri giorni. Le "macchine di Archimede" andrebbero invece

Pneumatica di Filone di Bisanzio, la cui principale fonte era certamente l'opera di Ctesibio, possa far sospettare che alcuni di questi dispositivi "inutili" potessero essere in realtà apparati sperimentali dimostrativi.

[61] Cfr., ad esempio, [Tölle-Kastenbein], p. 43.

[62] Questo punto è stato sottolineato in [Woodbury], p. 30. Cfr. anche [Prager: Filone], p. 12. Drachmann aveva invece creduto che le tecniche di molatura di superfici metalliche risalissero al Medio Evo islamico; cfr. [Drachmann KPH], p. 50.

[63] Polibio, *Storie*, VIII, 7-8-9.

[64] Plutarco, *Vita di Marcello*, XV, 1-3.

inquadrate nell'ambito dei progressi realizzati dalla tecnologia militare sin dall'inizio dell'epoca ellenistica, come è chiaro dal resoconto di Diodoro Siculo dell'assedio di Rodi da parte di Demetrio Poliorcete, nel 305 a.C.[65] Ecco come W.W.Tarn riassume la descrizione di alcune fasi dell'assedio:

> Demetrio dapprima attaccò il porto con le navi da guerra dietro una barriera galleggiante rivestita di ferro, e si impadronì del molo, ma due assalti furono respinti e i Rodii distrussero la barriera galleggiante e ripresero il molo. Demetrio allora livellò il terreno fino alle mura e avvicinò la sua "Distruttrice di città" (Helepolis), una grande torre blindata, a nove piani, la più grande che mai nessuno avesse visto, con portelli controllati meccanicamente da cui si sparavano colpi, costellata di catapulte e gremita di frombolieri; la macchina era coadiuvata da otto enormi "tartarughe", scudi che servivano a proteggere i genieri, i quali raggiungevano la posizione attraverso gallerie coperte, e da due arieti blindati, lunghi più di 50 m, che operavano sotto tettoie. Ma il grande assalto non riuscì: i Rodii avevano costruito un doppio muro all'interno e si diedero da fare per appiccare il fuoco all'Helepolis, scagliando nella notte decisiva 2300 enormi proiettili incendiari.[66]

Torri mobili del genere della *Helepolis*, le cui basi poggiavano su un gran numero di ruote, ebbero in seguito fino a venti piani.[67] Tra le macchine progettate in occasione dell'assedio di Rodi vi erano stati anche congegni capaci di agganciare e sollevare gli ordigni nemici, simili alle "macchine di Archimede" usate a Siracusa per sollevare le navi novantatré anni più tardi.[68]

La più potente arma da getto ellenistica[69] fu la catapulta a torsione: i primi esemplari, che lanciavano frecce, sembrano risalire all'assedio di Perinto da parte di Filippo II di Macedonia, del 340 a.C., mentre catapulte a torsione in grado di lanciare pietre furono usate probabilmente per la prima volta da Alessandro, in occasione dell'assedio di Tiro nel 332 a.C.[70] La po-

[65] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, XX, lxxxii-c. La *Helepolis* è descritta nel cap. xci.

[66] [Tarn], p. 440.

[67] Cfr. Vitruvio, *De architectura*, X, xiii, 5.

[68] Fu proprio grazie al progetto di una macchina di questo tipo che Callia ottenne l'incarico di architetto pubblico di Rodi. Cfr. Vitruvio, *De architectura*, X, xvi, 3.

[69] La principale opera sulla storia dell'artiglieria ellenistica è [Marsden HD]. I trattati ellenistici sull'argomento che sono sopravvissuti sono raccolti in [Marsden TT].

[70] Le *catapulte* più antiche di cui parlano alcune fonti erano in realtà dei γαστραφέτης (il cui uso è documentato per la prima volta nel 399 a.C.), cioè essenzialmente delle balestre, come dimostrato in [Marsden HD], pp. 48-64. Mentre la balestra può evolversi su basi puramente empiriche dall'arco (del quale è essenzialmente solo una diversa versione), il rapido sviluppo di armi basate su

tenza di queste armi crebbe rapidamente nel corso del III secolo.[71]

L'efficacia delle catapulte e delle altre armi da getto ellenistiche è provata, più che dai racconti di mura distrutte, dal fatto che in seguito alla loro introduzione (analogamente a quanto accadde in seguito all'uso delle armi da fuoco) cambiò la tecnica delle opere di difesa: non solo si rese più complessa la costruzione delle mura, ma si costruirono fino a tre linee alternate di fossati e mura.[72] Le scorte di palle di pietra trovate negli arsenali di Dura Europos e di Pergamo hanno confermato, del resto, l'attendibilità dei dati degli scritti tecnici ellenistici sul peso dei proiettili.[73]

Gli scienziati ellenistici idearono, tra le altre, armi a ripetizione[74] e armi pneumatiche (progettate da Ctesibio).[75] Gli autori che accennano a questi ordigni aggiungono in genere che essi rimasero allo stato di progetto. Fraser, ad esempio, sottolinea che, pur trattandosi di armi d'assedio, non abbiamo alcun resoconto di assedio che ne documenti l'uso[76]; non mi sembra però che si possa dedurne con certezza che tali armi non siano mai state usate, anche perché non ci è rimasto alcun resoconto di operazioni di assedio effettuate dall'esercito tolemaico.[77] Balestre a ripetizione simili, anche se meno sofisticate e potenti, alle catapulte a ripetizione descritte da Filone furono certamente usate secoli dopo in Cina e dettero ancora buona prova nella guerra cino-giapponese del 1894-95.[78]

I Romani non dettero alcun contributo allo sviluppo della tecnologia militare fino all'anonimo autore del *De rebus bellicis* (IV secolo d.C.). Ancora questo autore usa solo termini greci per tutte le macchine belliche.[79]

Nel Medio Evo in Europa occidentale si perse completamente la capacità di costruire macchine da guerra. La potenza delle

un principio completamente nuovo, quale l'uso dell'elasticità di torsione, appare connesso alla nuova possibilità di una "progettazione scientifica".

[71] La principale fonte sul rapido sviluppo tecnologico delle armi da getto nel III secolo a.C. è Erone, *Belopoiika*.

[72] Il rapporto tra sviluppo dell'artiglieria ellenistica ed evoluzione delle fortificazioni è analizzato in [Marsden HD], pp. 116-163.

[73] Cfr. [Rostovzev SESME] , vol. III, p.168, n. 49; [Marsden HD], 81-82.

[74] Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 73-77; [Marsden TT], 144-152.

[75] Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 77-78; [Marsden TT], 152-154.

[76] [Fraser], vol. I, p. 431.

[77] Come è osservato anche in [Fraser], vol I, p. 429.

[78] [Hall], p. 725; [Marsden TT], p. 178.

[79] Ci si può anche chiedere se effettivamente si tratta del primo romano che mostra interesse per le innovazioni tecnologiche o del primo grecofono che capisce la convenienza di scrivere in latino per vendere la propria tecnologia ai generali romani.

antiche catapulte poté essere di nuovo apprezzata solo quando si riuscì a ricostruirle sulla base delle indicazioni fornite dagli antichi trattati, cioè nel 1904, grazie al generale tedesco E. Schramm.

L' introduzione delle armi da fuoco nell'età moderna riguardò soprattutto i grossi calibri usati contro le fortificazioni fisse; come arma individuale l'archibugio non riuscì infatti per secoli a soppiantare la picca.[80] La funzione principale della polvere da sparo fu quindi quella di sostituire le catapulte, di cui si era perduta la tecnologia.

Da quando la scienza esiste, la tecnologia militare è sempre stata una motivazione e applicazione importante. In particolare la meccanica elaborata intorno al Seicento e la meccanica ellenistica appaiono collegate con le principali applicazioni militari delle due epoche, cioè armi da fuoco e catapulte. Nel primo caso la meccanica non può intervenire sull'energia impressa al proiettile (che dipende da una reazione chimica che sfugge alla scienza quantitativa dell'epoca) e gli scienziati si concentrano sul moto del proiettile dopo che è uscito dalla bocca da fuoco. È ben noto, infatti, che la scoperta delle leggi del moto dei gravi fu stimolata in modo essenziale dal problema di determinare le traiettorie dei proiettili. All'epoca delle catapulte, invece, il proiettile è spinto da una forza di natura elastica, che può essere calcolata e modificata con i metodi scientifici dell'epoca. Anche se non è chiaro perché non vi fosse interesse a studiare la traiettoria del proiettile (ma siamo certi che non vi fosse?), la lettura delle opere ellenistiche di tecnologia militare dimostra che la meccanica archimedea aveva importanti applicazioni alle armi da getto.[81]

Una novità di grande rilievo della tecnologia militare ellenistica consistette nel fatto che le nuove armi, analogamente a quanto avveniva in tutti gli altri settori, non erano il frutto dell'inventiva individuale di artigiani o generali, ma erano progettate con l'intervento dei maggiori scienziati dell'epoca.

La rilevanza della scienza per la tecnologia militare realmente usata è provata non solo dall'efficacia delle armi progettate scientificamente, ma anche dal fiorire della trattatistica sulla tecnologia militare. Evidentemente le conoscenze elaborate dagli scienziati non potevano essere usate dai costruttori se non attraverso l'uso di trattati specialistici. Nonostante l'evidente riservatezza di tali argomenti, sappiamo di vari trattati, in parti-

[80] Cfr., ad esempio, [Braudel], pp. 297-298.

[81] Cfr, ad esempio, Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 59; [Marsden TT], p.123. Sulla possibile esistenza di una dinamica ellenistica nel senso moderno del termine ritorneremo nel cap.9.

colare sulla costruzione di armi da getto (*belopoiika*) e sulla costruzione di macchine per assedio (*poliorcetica*); tra gli autori a noi noti sono Filone di Bisanzio, Bitone e Ateneo.[82] Di Filone ci restano tre opere: *Belopoiika*, *Paraskeuastica* (sulle opere di difesa) e *Poliorcetica*.[83] Le descrizioni contenute in questi trattati, e in particolare nei *Belopoiika* di Filone, sono di grande interesse perché ci illuminano sul livello generale della tecnologia meccanica del III secolo. Tra i nuovi elementi tecnologici descritti vi sono giunti cardanici (così detti perché furono attribuiti allo scienziato italiano del XVI secolo Gerolamo Cardano), usati per il puntamento, e le catene di trasmissione a maglie piane (usate per il caricamento delle catapulte a ripetizione) che erano state attribuite a Leonardo.[84]

Tra gli autori di opere di tecnologia militare basate sulla meccanica ellenistica vi erano diversi ingegneri attivi alla corte di Pergamo: ci è rimasto il breve libro che Bitone, nel III secolo a.C., dedicò ad Attalo I.[85] In epoca imperiale trattati di tecnologia militare furono scritti anche da Erone, del quale ci restano due opere.[86]

Le pagine più interessanti rimasteci sul rapporto tra matematica e tecnologia militare sono probabilmente quelle di Filone di Bisanzio, che, parlando della costruzione di catapulte, scrive:

> Molti che intrapresero la costruzione di macchine di uguale grandezza, adottando la stessa struttura, lo stesso tipo di legno e lo stesso metallo, senza cambiare neppure il peso, ne fecero alcune con

[82] Detto anche Ateneo Meccanico; da non confondere, naturalmente, con l'omonimo autore dei *Deipnosophistae*. Una lista di autori ellenistici di opere di tecnologia militare è fornita da Vitruvio (*De architectura*, VII, praef.).

[83] Le tre opere costituivano altrettanti libri di un unico vasto trattato sulla "meccanica". L'opera sulle armi da getto (*Belopoiika*) è pubblicata in [Marsden TT]; gli altri due scritti, che si sono conservati parzialmente, furono editi da H. Diels ed E. Schramm in [Philons Mechanik].

[84] La realizzazione delle catene di trasmissione fu una delle maggiori difficoltà incontrate nei tentativi moderni di ricostruzione delle antiche catapulte a ripetizione. Nel 1904 E. Schramm riuscì a realizzare armi efficienti usando catene per biciclette (che all'epoca erano un prodotto tecnologico recente). Le catene di Leonardo, simili a quelle descritte da Filone, sono disegnate nel codice Madrid (I, fogli 5 e 10). Catene simili appaiono anche nella "bicicletta" (opera forse di un allievo di Leonardo) scoperta sul verso del foglio 133 del Codice Atlantico (foglio che era stato occultato, incollandolo, nel XVI secolo ed è stato riportato alla luce solo di recente).

[85] Bitone, *Costruzione di macchine belliche e catapulte* [Marsden TT], pp. 66-103.

[86] *Belopoiika* e *Cheiroballistra*, opere entrambe pubblicate in [Marsden TT]. La prima opera è particolarmente interessante perché è l'unica opera conservata che fornisce informazioni anche sul primo stadio, meno sviluppato, dell'artiglieria greca.

lunga gittata e grande forza di penetrazione e altre di molto inferiori; e se si chiedeva loro il perché, non sapevano indicarne la causa. Si può applicare a questo argomento l'osservazione dello scultore Policleto: egli disse infatti che il giusto [risultato] si ottiene, mediante molti calcoli, grazie a piccole differenze. Allo stesso modo in questa tecnica, essendo necessari molti calcoli, piccole variazioni in alcune singole parti producono un grosso errore nel risultato finale. [...]
Successivamente, attraverso l'analisi degli errori fatti precedentemente e mediante l'osservazione dei risultati di esperimenti, è stato introdotto il criterio basilare della costruzione, cioè il diametro del foro attraverso cui passa la corda di tensione. Questo risultato fu raggiunto per la prima volta dai tecnici alessandrini, forniti di ricchi mezzi da re che amavano la fama e la tecnologia. Che non tutto si possa ottenere con il ragionamento e con i metodi della meccanica, ma che molto debba essere scoperto con esperimenti, risulta chiaro sia da molte altre cose che, in particolare, da ciò che dirò in seguito.[87]

Questo brano mostra come in epoca ellenistica fosse esplicitamente teorizzato quel rapporto tra matematica ed esperimenti che viene di solito considerato tipico del metodo galileiano.

È particolarmente interessante che l'uso della matematica nel trattare i dati sperimentali sia così consolidato da non essere scoraggiato dalla constatazione della variabilità apparentemente casuale del risultato concreto, che viene correttamente attribuita al fatto che la gittata di un proiettile può variare di molto per piccole variazioni dei dati costruttivi.[88]

Poco dopo il brano riportato, Filone fornisce la formula per calcolare il diametro del foro attraverso cui passa la corda di tensione (e quindi il diametro della corda stessa) in funzione del peso del proiettile che si vuole lanciare a una distanza data: il diametro è proporzionale, con dei coefficienti di proporzionalità forniti da Filone, alla radice cubica del peso. Il famoso problema della *duplicazione del cubo* (cioè dell'estrazione di radici cubiche) traeva quindi il suo interesse anche dall'esigenza di "calibrare" le catapulte. Un ingegnoso strumento meccanico (il *mesolabio*) fu progettato a questo scopo da Eratostene.[89]

[87] Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 50; [Marsden TT], pp. 106-108.

[88] L'idea di conciliare caso e determinismo con l'amplificazione, attraverso una catena di relazioni matematiche, di variazioni apparentemente trascurabili (l'idea, cioè, che il "caso" possa risolversi nel fatto che piccole cause possono generare grandi effetti) è stata apparentemente dimenticata, dopo Filone di Bisanzio, per molti secoli.

[89] La descrizione del mesolabio da parte di Eratostene è stata conservata (insieme ad altre soluzioni del problema) da Eutocio, nel suo *Commento al trattato di Archimede Sulla sfera e sul cilindro* (in [Mugler: Archimède], tome IV, pp. 64-69). Eratostene accenna all'utilità del suo strumento per la progettazione delle catapulte.

4.7. *La macchina di Anticitera*

Nel 1902, presso il relitto di una nave rinvenuto presso l'isola di Anticitera, tra il Peloponneso e Creta, furono trovati dei frammenti di rame fortemente corrosi, che apparivano i resti di un congegno di orologeria con complicati ingranaggi. Il meccanismo risale alla prima metà del I secolo a.C.,[90] ma il congegno apparve talmente diverso da qualsiasi oggetto noto risalente all'antichità classica che alcuni studiosi sostennero che dovesse trattarsi di un moderno orologio, affondato casualmente nel luogo del relitto.[91]

Le iscrizioni sui frammenti, leggibili soltanto in parte, rendono evidente che il congegno riguardava in qualche modo i moti del Sole e della Luna. Secondo la ricostruzione di Price il meccanismo costituiva una sorta di calendario perpetuo, che permetteva di calcolare le fasi della Luna, passate e future. A questo scopo una serie di ingranaggi trasferivano il movimeno da una ruota che rappresentava il ciclo solare (forse azionata con una manovella) a un'altra che indicava le rivoluzioni siderali della Luna, secondo il rapporto di 254 rivoluzioni siderali della Luna ogni 19 anni solari.

Dal punto di vista tecnologico due sono le caratteristiche più rilevanti del meccanismo. La prima è la complessità degli ingranaggi, che producono il rapporto desiderato, 254:19, con l'impiego di una ventina di ruote dentate. È questa complessità che fa istintivamente classificare l'oggetto tra i lavori di "orologeria". La seconda caratteristica è la più notevole ed è la presenza di un differenziale, cioè di un meccanismo che permette di produrre una rotazione di velocità pari alla differenza (o alla somma) di due rotazioni date. La funzione del differenziale era quella di mostrare, oltre ai mesi lunari siderali, anche le lunazioni (ottenute sottraendo il moto solare al moto lunare siderale).

Price arriva alla conclusione che la presenza di questo singolo oggetto di "alta tecnologia" è sufficiente per modificare le nostre idee sulla civiltà classica e smentire definitivamente i luoghi comuni sul disprezzo dei Greci per la tecnologia e sull'insupera-

[90] Jacques Cousteau nel 1985 trovò sul relitto alcune monete coniate a Pergamo nel 86 a.C. (cfr. [Casson], p.224). Il naufragio risale probabilmente a non molti anni più tardi.

[91] Non vi sono dubbi sull'antichità dei reperti, anche perché la datazione del meccanismo basata sull'analisi paleografica delle iscrizioni presenti sui frammenti è coerente con quella del relitto. Per una descrizione accurata dei reperti e una ricostruzione dell'intera macchina occorre leggere [Price gears]. La descrizione in [Price strumenti] era stata scritta prima che l'autore iniziasse lo studio diretto dei frammenti ed è completamente superata.

bile solco che l'istituzione della schiavitù avrebbe creato tra la teoria e le scienze sperimentali e applicative.[92]

4.8. *Fonti naturali di energia*

La progettazione di macchine come quelle accennate nel §4.5 per il sollevamento dell'acqua, che riducevano l'azione necessaria a un semplice moto di rotazione, non solo permetteva di sostituire l'uomo con un animale, ma poneva anche l'esigenza di trovare fonti di energia motrice diverse da quella animale. In effetti in epoca ellenistica furono utilizzate varie fonti naturali di energia.

Energia idraulica. Il più antico mulino idraulico ellenistico datato con certezza è quello fatto costruire dal re del Ponto Mitridate VI (120 a.C.-63 a.C.) a Cabeira.[93] In un epigramma di Antipatro di Tessalonica (I secolo a.C.), incluso nell'*Anthologia Graeca*, è scritto:

> Smettete di macinare, o donne che lavorate al mulino; dormite sino a tardi, anche se il canto del gallo annuncia l'alba. Poiché Demetrio ha ordinato alle ninfe di eseguire il lavoro che facevate con le vostre mani, ed esse, saltando giù dalla sommità della ruota, fanno girare l'assale che, con le sue razze rotanti, fa girare le pesanti macine concave di Nisiria.[94]

Poiché non si capisce come si faccia a saltar giù "dalla sommità" di una ruota orizzontale, Antipatro si riferisce evidentemente a una ruota verticale. Questo particolare ha la sua importanza perché il mulino verticale è molto più efficiente, ma per costruirlo bisogna saper trasferire il moto dall'asse orizzontale della ruota idraulica all'asse verticale della macina: un problema non banale, del tipo di quelli di cui erano esperti i meccanici alessandrini. Il mulino verticale è stato per secoli chiamato *mulino di Vitruvio* e attribuito ai Romani solo perché Vitruvio lo aveva descritto senza ricordare esplicitamente la sua origine ellenistica.[95]

[92] Cfr. [Price science], p.42; [Price gears], p. 51. Price, affermando che lo studio della macchina di Anticitera deve mutare in profondità la nostra visione della civiltà classica, sembra riferire anche un'esperienza personale, poiché egli aveva mostrato opinioni diverse sulla tecnologia greca nei suoi articoli in [HT] (scritti una ventina d'anni prima).

[93] Strabone, *Geografia*, XII, iii, 30.

[94] *Anthologia Graeca*, IX, 418. L'espressione tradotta "saltando giù dalla sommità della ruota" è κατ' ἀκροτάτην ἁλλόμεναι τροχιήν.

[95] Vitruvio, *De architectura*, X, v. Nella principale opera sulla storia della tecnologia ([HT]) R.J. Forbes attribuisce l'invenzione del mulino verticale a un

Marc Bloch, nel suo saggio sui mulini idraulici, ne aveva attribuito per primo l'invenzione all'"Oriente mediterraneo", sulla base, tra l'altro, della considerazione che altrimenti non si capirebbe perché Vitruvio dovrebbe chiamarlo col suo nome greco *hydraletes* (ὑδραλέτης).[96] È anche molto probabile che il mulino idraulico verticale sia nato dall'idea di usare "a rovescio" una *sakiyeh*[97]; sarebbe quindi riconoscibile come un prodotto della tecnologia ellenistica anche se non avessimo l'epigramma di Antipatro e la documentazione del mulino di Cabeira. È interessante notare che a Bloch nel suo saggio appaia strano che l'invenzione sia dovuta a "popolazioni mediterranee", nonostante i corsi d'acqua mediterranei, per la loro irregolarità, non siano molto adatti come forza motrice. La circostanza che tra i "popoli mediterranei" vi fossero i creatori sia della meccanica che dell'idraulica non è presa in considerazione. Marc Bloch, uno degli iniziatori della "storia della civiltà materiale", è stato certamente uno dei massimi storici del nostro secolo, ma, trattandosi di un medievalista, cioè di uno storico specializzato nello studio di una civiltà prescientifica, difficilmente avrebbe potuto essere proprio lui a chiarire per primo il rapporto, sempre così mal compreso, tra la scienza e la tecnologia scientifica ellenistiche.[98]

Energia eolica. Le origini del mulino a vento sono in genere considerate sconosciute. Il più antico esemplare documentato è quello fatto costruire dal califfo Omar I (634-644) a un persiano che si era dichiarato in grado di realizzarlo.

In verità Erone, sei secoli prima, parlando di un organo pneumatico azionato da una ruota provvista di pale, aveva descritto la ruota dicendola simile a un ἀνεμούριον, cioè, letteralmente, a una *ruota a vento*, che evidentemente considerava un oggetto ben noto al lettore.[99] Nei manoscritti il passo è illustrato con disegni che mostrano l'organo provvisto di una *ruota a vento* che aziona un pistone.

"ingegnere romano del I secolo a.C.". Forbes cita l'epigramma di Antipatro, ma afferma, senza portare argomenti, che quei versi si riferiscono a un mulino in genere e non a un mulino verticale ([Forbes EM], p. 603).

[96] [Bloch MA].

[97] Come notato da Bloch nel saggio citato, questa origine del mulino idraulico spiegherebbe perché Vitruvio parli del mulino a proposito delle macchine per il sollevamento dell'acqua: l'ordine seguito nel *De architectura* (X, iv-v) ripete probabilmente quello, basato sullo sviluppo storico, che era nella fonte di Vitruvio.

[98] La circostanza che l'attribuzione del mulino idraulico verticale alla civiltà ellenistica sia venuta da un grande storico medievalista e non da uno specialista in storia della tecnologia è comunque significativa.

[99] Erone, *Pneumatica*, I, xlviii.

Lo storico della tecnologia R.J. Forbes spiega però che, poiché sappiamo che i mulini a vento erano sconosciuti al mondo classico, i disegni nei manoscritti dell'opera di Erone debbono essere aggiunte posteriori di amanuensi che li conoscevano.[100] Quanto all'affermazione di Erone sulle *ruote a vento*, Forbes spiega che non bisogna tenerne conto, perché non è confermata da altre citazioni. In realtà la testimonianza di Erone non solo sarebbe del tutto inspiegabile se alla sua epoca non fossero esistite "ruote a vento", ma appare del tutto credibile alla luce delle considerazioni seguenti.

• L'introduzione delle ruote idrauliche dimostra che nella civiltà ellenistica vi era l'esigenza di usare fonti naturali di energia motrice. D'altra parte nella maggior parte del mondo ellenistico non vi erano corsi d'acqua adatti all'istallazione di ruote idrauliche, come notato da Bloch nel suo saggio, mentre vi erano molte zone sufficientemente ventose, come è dimostrato dal fatto che nel Medio Evo i mulini a vento erano diffusi in diverse regioni già appartenute ai regni ellenistici (ad esempio in Persia, a Creta e nelle isole dell'Egeo).

• Le fonti arabe in ogni caso non potrebbero essere più antiche della prima metà del VII secolo e questo è certo un ottimo motivo per trovarvi la più antica documentazione islamica sull'argomento. Il persiano rivoltosi a Omar potrebbe essere stato il continuatore di un'antica tradizione.

• La tecnologia necessaria per costruire un mulino a vento è notevolmente diversa da quella relativa al mulino ad acqua. La differenza fondamentale sta nel fatto che nel primo caso occorre saper generare una rotazione attorno a un asse che ha la stessa direzione della forza del vento. Occorre per questo un'"elica",[101] occorre cioè saper usare, sostanzialmente, quella stessa combinazione di geometria e meccanica che già nel III secolo a.C. era stata studiata teoricamente e allo stesso tempo applicata con grande fantasia, adattandola alle circostanze più diverse, dalla coclea al torchio.[102] L'idea di un uso tecnologico del vento non appare, d'altra parte, strana in una civiltà che univa alla tradizione millenaria della navigazione a vela la recente creazione della scienza della pneumatica e di tante applicazioni connesse al movimento dell'aria: dalla tecnologia delle

[100] [Forbes EM], p. 624.

[101] Gli scienziati ellenistici avevano usato questo termine (ἕλιξ) sia per le "spirali di Archimede" che per quelle superfici, come la superficie interna della coclea, che avevano la funzione di trasformare un moto rotatorio in un moto traslatorio lungo l'asse di rotazione o viceversa. In tale senso la parola è usata da Erone.

[102] Sulla datazione del torchio torneremo nel §5.3.

pompe all'introduzione, di cui riparleremo, degli organi e della soffiatura del vetro.

• Il termine usato da Erone per *mulino a vento*, ἀνεμούριον, è attestato anche come toponimo, del quale non è difficile immaginare l'origine. Fu dato questo nome, in particolare, a due promontori in Cilicia.[103]

Vapore. Erone descrive due macchine a vapore: un modellino dimostrativo (l' *eolipila*) e un dispositivo usato per aprire le porte di un tempio accendendo un fuoco.[104] Le macchine a vapore di Erone sono state in genere considerate delle bizzarrie destinate a generare stupore, ma se si inquadra la loro costruzione nell'ambito della civiltà che aveva sfruttato l'energia idraulica e l'energia eolica, possono apparire un momento della ricerca di fonti di energia non dipendenti dalle particolarità geografiche.

Va sottolineato che le macchine a vapore moderne non sono affatto indipendenti, come si è portati spesso a credere, dalle macchine ellenistiche, ma discendono, attraverso un filo continuo, dalle descrizioni di Erone, che furono intensamente studiate, tra gli altri, da Leonardo da Vinci; la possibilità di sfruttare il vapore come forma di energia motrice fu poi riconsiderata da G. B. Della Porta nei *Tre libri de' spiritali* (1606), basati sulla *Pneumatica* di Erone.[105] La prima macchina a vapore effettivamente costruita in epoca moderna sembra sia stata quella descritta nel 1615 da Salomon de Caus e serviva ad azionare una fontana ornamentale a intermittenza: la dipendenza da Erone era evidentemente così forte da indicare anche l'uso di tali macchine. La tecnologia eroniana sopravvisse ancora per circa un secolo, a opera di vari autori, fin quando divenne economicamente conveniente iniziare a costruire macchine a vapore a uso industriale.[106]

[103] Cfr. Strabone, *Geografia*, XIV, 5, 3; XIV, 5, 5.

[104] Erone, *Pneumatica*, II, xi; I, xxxviii.

[105] Il titolo dell'opera di Della Porta va spiegato, mi sembra, con il fatto che con la fine dell'antica scienza anche della parola πνεῦμα si era dimenticato il significato datole dagli scienziati ellenistici. πνεῦμα veniva così tradotto *spirito*, che corrispondeva abbastanza bene al significato che la parola aveva avuto nel periodo classico. Rifacendo in questo modo in senso inverso la strada percorsa da Ctesibio ed Erofilo, si ottenne il buffo risultato di associare nella stessa terminologia enti "spirituali" e oggetti come le macchine a vapore.

[106] Cioè quando non fu più possibile soddisfare la fame di energia dell'industria in rapido sviluppo con le sole ruote idrauliche.

4.9. *La tecnologia descritta da Erone*

La più famosa documentazione scritta rimastaci sulla tecnologia ellenistica è costituita dalle opere di Erone di Alessandria. Erone, vissuto molto probabilmente nel primo secolo della nostra era,[107] descrive una grande quantità di "macchine meravigliose", in particolare nella sua *Pneumatica* e nella sua opera *Sulla costruzione di automi*. Tra le macchine di Erone vi è, ad esempio, un distributore automatico: introducendo una moneta da cinque dracme la macchina versava una quantità prefissata di liquido.[108] I progetti che sorprendono di più il lettore moderno sono forse quelli di spettacoli teatrali automatici.[109] Ogni spettacolo, recitato da automi, è suddiviso in "quadri"; un sipario automatico è abbassato per qualche istante tra ciascun quadro e il successivo, permettendo agli automi di ridisporsi in modo diverso (ovviamente "automaticamente") senza esser visti.

Erone conosce e usa, tra l'altro, viti di precisione, cremagliere, ingranaggi demoltiplicatori, catene di trasmissione, eliche, stantuffi e vari tipi di valvole. Egli sfrutta inoltre sia varie proprietà dei fluidi che le fonti naturali di energia già ricordate: energia idraulica, eolica e vapore.

L'uso di Erone, spesso ludico, della tecnologia e i pregiudizi sulla civiltà classica hanno in genere fuorviato, a mio parere, l'interpretazione della sua testimonianza. Il brano seguente di Dijksterhuis esemplifica bene le opinioni generalmente espresse su Erone:

> Egli [Erone] ha a sua disposizione altrettante possibilità fisiche e tecniche quante ne avevano gli inventori del Settecento che con la loro opera resero possibile la rivoluzione industriale. Perché allora, si è continuamente inclini a chiedersi, Erone non realizzò nulla di paragonabile alla loro opera e perché si limitò alla costruzione di strumenti privi di alcuna utilità pratica?[110]

[107] Il principale elemento utile per la datazione di Erone è l'eclissi lunare usata come esempio nella *Dioptra*, che è stata univocamente individuata da Neugebauer come l'eclissi del 13 marzo 62 d.C. ([Neugebauer Heron]). Erone potrebbe anche aver ripreso la descrizione di un autore precedente, ma è ben più probabile che avesse usato come esempio un'eclissi recente. In ogni caso la data del 62 d.C. è certamente valida come limite inferiore. D'altra parte la datazione che era stata proposta come la più probabile sia da Heiberg che da Heath, e cioè il III secolo d.C., è contraddetta dal fatto che Sesto Empirico, intorno al 200 d.C., sembra citare Erone, pur senza nominarlo esplicitamente (cfr. il prossimo § 9.1).

[108] Erone, *Pneumatica*, I, xxi.

[109] Erone, *Sulla costruzione di automi*.

[110] [Dijksterhuis MIM], p.103. Dijksterhuis è stato uno studioso cui dobbiamo molto per la nostra conoscenza della scienza ellenistica, soprattutto per i suoi lavori su Archimede.

Osserviamo anzitutto che la tecnologia descritta da Erone è troppo complessa per poter essere attribuita a un singolo inventore. Anche per quanto riguarda argomenti teorici, d'altra parte, Erone ci appare sempre più un compilatore privo di originalità via via che le nostre conoscenze sulla scienza ellenistica aumentano. Nel caso dei procedimenti "algebrici", dei quali una volta era considerato l'inventore, la decifrazione di testi cuneiformi ha rivelato che si trattava di procedimenti usati da lungo tempo in Mesopotamia [111]; la *formula di Erone* per calcolare l'area di un triangolo è attribuita ad Archimede dal matematico arabo al-Bīrūnī [112]; le *Definizioni di Erone* sono esplicitamente una compilazione divulgativa; il principio dei vasi comunicanti, ancora attribuito in genere a Erone, [113] non solo è implicito nel postulato di Archimede, [114] ma era certamente alla base delle condotte forzate ellenistiche costruite secoli prima di Erone. [115] Gli esempi potrebbero continuare.

Il contributo personale di Erone può aver riguardato alcune delle applicazioni descritte, ma non la tecnologia di base usata, per la cui datazione elenchiamo alcuni elementi utili.

- L'uso da parte di Erone della tecnologia meccanica e dei fluidi è basato sulle teorie scientifiche della meccanica, dell'idrostatica e della pneumatica, risalenti tutte e tre al III secolo a.C. Allo stesso secolo risalgono sia elementi di base usati da Erone, quali viti di precisione, ruote dentate e valvole, sia lo straordinario sviluppo tecnologico provato, tra l'altro, dalle testimonianze sulle costruzioni navali e le macchine belliche.
- Nel caso dei trattati sulle armi da getto, il rapporto tra Erone e le sue fonti è stato analizzato con cura da Marsden, [116] che conclude che "nonostante la sua data, il contenuto tecnico di questo lavoro [i *Belopoiika* di Erone] appartiene al III secolo a.C.". [117] Marsden fa notare, tra l'altro, non solo che alcuni dettagli delle armi descritte da Erone (basandosi sull'opera di Ctesibio) erano stati già criticati da Filone di Bisanzio, [118] ma anche che Erone inizia i suoi *Belopoiika* sottolineando l'importanza dell'artiglieria per difendere la sicurezza della propria città: una raccomandazione evidentemente ripresa da fonti precedenti all'instaurazione della "pax romana".

[111] Su questo punto cfr., ad esempio, [Neugebauer HAMA], p. 847.
[112] Cfr. [Suter: al-Bīrūnī], p. 39.
[113] Cfr., ad esempio, [Tölle- Kastenbein], p. 90.
[114] Cfr. sopra, p. 95.
[115] Cfr. sopra, p. 130.
[116] Oltre a [Marsden HD], cfr. anche [Marsden TT], pp. 1-2.
[117] [Marsden HD], p. 3.
[118] Filone di Bisanzio, *Belopoiika*. Questa circostanza era stata usata per dedurne che Erone avesse preceduto Filone di Bisanzio (cfr., ad esempio,

• La costruzione di automi risaliva anch'essa al III secolo a.C. e più precisamente alla prima metà del secolo. Secondo Vitruvio (che cita come fonte i *Commentari* di Ctesibio) gli orologi costruiti da Ctesibio potevano azionare automi a ore prefissate[119]; nella descrizione di Callisseno della famosa parata organizzata da Tolomeo II Filadelfo si parla di una statua di Nisa seduta capace di alzarsi in piedi, fare libagioni di latte e rimettersi a sedere.[120] Erone nel suo trattato *Sulla costruzione di automi*, in cui descrive spettacoli teatrali automatici, cita più volte un'opera di Filone di Bisanzio sullo stesso argomento, criticandone dei dettagli e vantandosi di riuscire a superare Filone in alcuni particolari, ad esempio nel numero di movimenti contemporanei di ciascun automa. La tecnologia usata in questo settore nel primo ellenismo non doveva differire molto, evidentemente, da quella descritta da Erone.

• Sia Ctesibio che Filone di Bisanzio avevano descritto molti apparecchi basati sulla pneumatica.[121] D'altra parte di alcune parti della *Pneumatica* di Erone sono state individuate le fonti: si tratta di fonti risalenti al III secolo a.C.; oltre all'opera di Ctesibio (cui è certamente attinta la descrizione dell'organo idraulico) Erone usò probabilmente anche gli scritti di Stratone di Lampsaco (in particolare per l'introduzione, come sostenuto per primo da Diels).

• La diottra descritta da Erone molto probabilmente era nota a Ipparco.[122] Ipparco aveva infatti perfezionato e descritto diottre[123] e il sospetto che su questo argomento Erone usasse Ipparco come fonte sembra rafforzato dalla circostanza che il metodo descritto da Erone nella *Dioptra* per determinare la differenza di longitudine tra Alessandria e Roma (basato sulla misura della differenza tra i tempi locali di una stessa eclisse lunare) è quello che era stato proposto da Ipparco, come sap-

[Heath HGM], vol. II, p. 302). La fallacia del presunto sillogismo, come in molti altri casi analoghi, dipendeva dalla falsità della seconda premessa, assunta implicitamente come ovvia: quella che l'intervallo tra i due scienziati fosse stato un'epoca di progresso e non di regresso tecnologico.

[119] Vitruvio, *De architectura*, IX, viii, 4-5.

[120] Cfr. Ateneo, *Deipnosophistae*, V, 198.

[121] Cfr. sopra, §3.6.

[122] È questa anche l'opinione di Toomer ([Toomer: *Almagesto*], p. 227, n. 20).

[123] Tolomeo accenna all'uso di apparecchi ottici da parte di Ipparco e a sue descrizioni scritte di una diottra (*Almagesto*, V, v, 369; V, xiv, 417); il contributo di Ipparco al perfezionamento di apparecchi ottici per le osservazioni astronomiche è riferito anche da Plinio (*Naturalis historia*, II, 95). La precisione degli strumenti ottici usati da Ipparco e in particolare l'accuratezza delle sue misure angolari può essere stimata dall'ottima approssimazione della sua misura della distanza della Luna (cfr. sopra, p. 101, n. 87).

piamo da Strabone.[124] Se la diottra descritta da Erone fosse stata uno strumento inventato ad Alessandria in età imperiale sarebbe d'altra parte veramente difficile spiegare come mai Tolomeo la ignori.[125]

• Il problema della datazione di Erone è rimasto aperto per secoli anche perché nelle sue opere Erone cita spesso scienziati del primo ellenismo (ad esempio Archimede, Ctesibio e Filone di Bisanzio) ma mai suoi contemporanei noti. Evidentemente Erone (contrariamente a ciò che è stato spesso ripetuto) non appartiene affatto a una scuola rimasta viva dai tempi di Ctesibio, ma trae le sue conoscenze dalla lettura di antiche opere. Le tradizioni scientifiche alessandrine si erano infatti drammaticamente interrotte nel 145 a.C. e, come abbiamo già notato, il principale elemento di continuità attraverso i secoli bui che separano l'Alessandria di quei tragici avvenimenti da quella dell'epoca imperiale era rappresentato dalla sopravvivenza della Biblioteca.[126]

Vi sono, in definitiva, tutti i motivi per ritenere che la tecnologia descritta da Erone risalga ai secoli III e II a.C. I seguenti indizi fanno inoltre sospettare che Erone descriva un'antica tecnologia che ai suoi tempi si era già in parte perduta.[127]

• Nella diottra (e in altri apparecchi descritti da Erone) sono usate piccole viti di metallo, ma quando (nella *Meccanica*) si occupa della realizzazione delle viti Erone descrive solo metodi (molto più accessibili) per costruire grandi viti di legno.

• Erone, nella *Meccanica*, nell'ambito di una trattazione teorica, descrive ingranaggi demoltiplicatori, ma quando, nell'opera *Sulla costruzione di automi*, deve sistematicamente trasferire il moto da una ruota all'altra non usa mai ingranaggi, ma esclusivamente dispositivi a frizione. La cosa diviene facilmente comprensibile se si suppone che alla sua epoca fosse difficile procurarsi non solo viti metalliche di precisione, ma anche ruote dentate.

• Nei pochi casi in cui esiste una documentazione diretta, la tecnologia dei secoli precedenti appare più raffinata di quella di Erone, le cui opere, ad esempio, non avrebbero fatto sospettare

[124] Cfr. Strabone, *Geografia*, I, i, 12.

[125] Egli infatti descrive strumenti più primitivi usati allo stesso scopo. Questa circostanza, congiunta alla diffusa fede nel continuo progresso tecnologico, era stata usata come argomento per datare Erone dopo Tolomeo (cfr. [Heath HGM], vol. II, p. 305).

[126] Cfr. sopra, pp. 28 e 91 (in particolare n. 56).

[127] In altre parole viene il dubbio che Price (cfr. sopra, p. 120) potesse aver ragione nel considerare la diottra di Erone "un'invenzione la cui complessità superava le risorse tecniche dell'epoca", non però perché all'epoca di Erone l'invenzione fosse "prematura", ma per il motivo opposto.

l'esistenza del differenziale documentato dalla macchina di Anticitera (più antica di Erone di circa un secolo e mezzo[128]).

Le opere di Erone forniscono quindi una testimonianza preziosa ma tarda e incompleta sul livello tecnologico ellenistico e non possono essere usate senza grande cautela per dedurne le motivazioni con le quali secoli prima, in un clima culturale e politico completamente diverso, la tecnologia descritta era nata e si era sviluppata. A questo scopo possono essere utili le seguenti osservazioni.

• Sia la meccanica che la pneumatica erano nate in stretta connessione con la tecnologia ed entrambe avevano permesso sin dal III secolo a.C., come abbiamo visto, la progettazione di molte macchine economicamente utili.

• Lo stesso Erone descrive anche congegni che non sono certamente "giocattoli", come armi da getto, vari tipi di presse, macchine per sollevare pesi, la diottra e la filettatrice di madreviti.

• Un numero crescente di elementi della tecnologia eroniana è stato riconosciuto come usato in epoca ellenistica a scopi ben più seri. Ad esempio:

Sapevamo dello sfruttamento dell'energia idraulica nei modellini di Erone. Ora sappiamo, grazie a Bloch, che a quei modellini corrispondevano da secoli impianti basati su efficienti ruote idrauliche verticali.

Sapevamo dell'uso della pressione dei fluidi nei "giocattoli" di Erone. Dagli scavi archeologici di questo secolo abbiamo appreso che gli stessi principi erano stati usati per costruire condotte forzate per rifornire d'acqua le città e per realizzare pompe aspiranti e prementi di uso diffuso.

Sapevamo dell'uso nelle opere di Erone dei principi dell'idrostatica. L'archeologia subacquea ci ha mostrato come, sulla base degli stessi principi, si costruissero già nel III secolo a.C. navi di grandi dimensioni e foderate di piombo.

• A volte Erone si riferisce a una preesistente tecnologia produttiva su cui è fondato il nuovo uso proposto. Ad esempio, come abbiamo già notato, per illustrare uno dei suoi organi, Erone spiega che funziona come nelle *ruote a vento*.

• Gli automi, per i quali viene mostrato interesse sin dal III secolo a.C., non sono altro che meccanismi in grado di tra-

[128] Cfr. sopra, §4.7. Osserviamo che il planetario di Archimede doveva riprodurre i giusti rapporti tra le velocità non solo del Sole e della Luna, ma anche dei pianeti. Poiché sappiamo che all'epoca di Archimede erano già in uso vari ingranaggi e, d'altra parte, la decadenza scientifica era certamente già in atto all'epoca della macchina di Anticitera (che è l'epoca di Posidonio), si può immaginare che il planetario di Archimede fosse stato tecnologicamente ancora più raffinato.

sformare un semplice moto di rotazione in movimenti complessi, analoghi a quelli effettuati nel lavoro umano. Meccanismi del genere erano stati usati sin dal primo ellenismo sia per scopi bellici che per risparmiare forza lavoro, come abbiamo visto nel caso della catapulta a ripetizione e in quello della *sakiyeh*. Come vedremo nel §6.2, nello stesso periodo erano state introdotte anche macchine agricole automatiche.

• Gli inventori del Settecento non solo avevano, come osserva Dijksterhuis, *altrettante* possibilità fisiche e tecniche quante ne aveva avute Erone, ma avevano proprio le sue stesse possibilità. Poiché la tecnologia, esattamente come le teorie scientifiche, non è univocamente determinata dalla natura, ma è un prodotto culturale, questa coincidenza deve far riflettere. Essa non può che essere dovuta al fatto che all'origine della tecnologia settecentesca vi erano le opere ellenistiche, studiate sin dal XIII secolo, grazie soprattutto ai manoscritti posseduti dagli Arabi di Spagna, e poi, più intensamente, in tutta Europa, dal XV secolo in poi.

• La circostanza che nei primi secoli dell'età moderna la conoscenza di molti elementi tecnologici (come i sifoni, le eliche o le macchine a vapore) abbia preceduto qualsiasi loro applicazione utile sarebbe ben strana se non fosse esaurientemente chiarita dall'osservazione precedente.

• Come osservato implicitamente da Dijksterhuis, la rivoluzione industriale europea si è basata in modo essenziale sui dispositivi descritti nelle opere ellenistiche e in particolare in quelle di Erone. Ciò mostra quanto potessero essere importanti per le tecniche produttive le informazioni trasmesse da Erone.

• Ci è rimasto così poco della letteratura ellenistica che l'attuale scarsezza di fonti sulle tecniche produttive dell'epoca non è affatto sorprendente. L'eccezionale trasmissione delle opere di Erone attraverso civiltà prescientifiche e di basso livello tecnologico è certamente dovuta in larga misura proprio all'aspetto stupefacente e all'uso ludico dei dispositivi descritti.

In conclusione, molti degli apparecchi di Erone potrebbero essere interpretati come sottoprodotti della tecnologia ellenistica (inizialmente sviluppata per scopi ben più seri) che proprio grazie alla propria natura ludica erano riusciti a sopravvivere e svilupparsi nelle nuove condizioni dell'età imperiale. Altrimenti, accettando le opinioni in genere espresse su Erone, bisognerebbe trarne la deprimente conseguenza che la civiltà europea moderna, per sviluppare la propria tecnologia, non abbia saputo far di meglio, per secoli, che continuare ad attingere idee dal lavoro isolato di un antico costruttore di giocattoli.

4.10. *La tecnologia perduta*

Lo sviluppo tecnologico ellenistico, come accadde anche all'inizio della nostra rivoluzione industriale, riguardò le tecniche produttive ben più dei beni di consumo prodotti. [129] D'altra parte la cura con cui anche nell'Antichità si è custodito il segreto su questi argomenti è documentata in molti casi. I Romani acquistarono per secoli, attraverso intermediari, il cosiddetto "acciaio serico", prodotto in India, senza riuscirne a capire non solo il procedimento di produzione, ma neppure la regione di provenienza. Famoso è il caso della seta, che è stata importata dalla Cina per più di un millennio senza che si riuscisse a capirne l'origine. Per quanto riguarda in particolare l'epoca ellenistica, abbiamo già ricordato come Strabone riferisca che a Rodi, a Cizico e a Marsiglia la tecnologia meccanica fosse coperta dal segreto [130] e vedremo che probabilmente altrettanto segrete erano in Egitto le conoscenze di chimica. [131] Nei regni ellenistici la riservatezza sui procedimenti tecnologici era favorita dal controllo sulle principali produzioni esercitato dai sovrani [132] e, nei casi dell'Egitto e della Mesopotamia, dall'antica tradizione del controllo esercitato dalla casta sacerdotale sulle produzioni riservate ai templi: un sistema lasciato sopravvivere dai Tolomei nei confronti delle industrie indigene, ma affiancato da sistemi diversi di controllo nelle comunità greche. Non è quindi sorprendente che non si sappia quasi nulla, ad esempio, sulla tecnica delle fornaci o della tessitura o sui procedimenti usati per la produzione di profumi o di particolari qualità di vetro.

In questa situazione si può pensare che di una parte della tecnologia ellenistica non sia rimasta traccia diretta nelle poche fonti a nostra disposizione.

L'idea che gli "Antichi" avessero posseduto una tecnologia potentissima si è perpetuata attraverso il Medio Evo, in particolare nella tradizione alchimistica. Il fatto che questa tradizione sia stata evidentemente inquinata con la contaminazione di conoscenze di origine scientifica con elementi magici, [133] pur rendendone molto difficile l'uso in casi specifici, non annulla il va-

[129] Nell'antica letteratura vi è però qualche accenno alla continua introduzione di prodotti nuovi, che non sempre soddisfacevano bisogni reali; Ateneo, ad esempio, riporta considerazioni di questo tipo a proposito del moltiplicarsi dei profumi (*Deipnosophistae*, XV, 692B).

[130] Cfr. sopra, pp. 125 e 127.

[131] Cfr. avanti, pp. 174-175.

[132] Sull'interesse dei sovrani per la tecnologia produttiva torneremo nel prossimo cap. 6.

[133] Due esempi di questo fenomeno nell'ambito dell'ottica sono forniti dalla credenza nel potere magico delle "sfere di cristallo" (originata probabil-

lore complessivo di queste testimonianze. Ruggero Bacone scrive:

> Si potranno fare navigli che procedano senza rematori, [...] parimenti potranno farsi carri non tirati da alcun animale, che procedano con incredibile forza, come si legge dei carri falcati degli antichi. Potranno essere costruite macchine per volare, [...] Inoltre si potranno fare strumenti che siano piccoli in sé, ma che siano sufficienti a sollevare ed abbassare pesi enormi [...] Queste macchine furono costruite nell'Antichità.[134]

Anche se questo di Ruggero Bacone può sembrare a prima vista un pio elenco di desideri, esso contiene diversi riferimenti a oggetti citati anche nella letteratura classica. A parte le macchine per sollevare pesi, la cui costruzione non era stata certo un problema, Polibio ricorda una macchina semovente dimostrativa esibita in un corteo[135] e navi senza rematori sono illustrate nel *De rebus bellicis*.[136]

Va osservato che Ruggero Bacone scrive nel XIII secolo, all'epoca del primo importante flusso di manoscritti ellenistici verso l'Occidente: da Bisanzio (saccheggiata dai partecipanti alla IV crociata) e dalle regioni riconquistate all'Islam: Spagna e Sicilia.[137]

Tra i prodotti tecnologici sui quali abbiamo poche informazioni, la cui esistenza nell'antichità è stata oggetto di opinioni contrastanti, vi sono lenti di ingrandimento ed eventuali apparecchi ottici basati su lenti.

Gli scienziati ellenistici avevano sviluppato, accanto all'ottica (della propagazione rettilinea) e alla catottrica, anche lo studio della rifrazione, cui è dedicata una parte importante dell' *Ottica* di Tolomeo. L'ottica era utilizzata per progettare strumenti come la diottra e l'astrolabio piano. Tra le applicazioni

mente dalle conoscenze relative alle proprietà ingrandenti delle lenti sferiche) e dal nome di "lanterna magica", con cui si indicò un semplice proiettore che risale almeno agli Arabi.

[134] Ruggero Bacone, *Epistola de secretis operibus*.

[135] Polibio, *Storie*, XII, 13, 11. La descrizione di Polibio è tratta da Democare. La macchina era stata costruita ad Atene per Demetrio Falereo (che sarebbe poi divenuto uno dei principali ispiratori della politica culturale dei primi Tolomei) sul finire del IV secolo a.C.

[136] Si tratta di battelli a ruota, che l'anonimo autore del IV secolo d.C. avrebbe voluto azionare con buoi. Battelli a ruota simili sarebbero stati realmente costruiti in età moderna (quando cominciò ad applicarsi alle navi la propulsione a vapore).

[137] Abbiamo già ricordato che le opere di Archimede penetrarono in Europa attraverso le biblioteche di Federico II di Svevia e degli Angioini. Torneremo sull'argomento nel §10.1.

della catottrica vi sono i fari e gli specchi ustori. Si può supporre che anche lo studio della rifrazione avesse avuto qualche applicazione.

L'uso di lenti per concentrare i raggi solari è d'altra parte documentato in Grecia almeno dal V secolo[138] e anche Teofrasto sembra alludere alla possibilità di accendere un fuoco facendo convergere i raggi del sole con una lente[139]; Plinio accenna all'uso medico di lenti convergenti per cauterizzare.[140]

Gli archeologi hanno trovato oggetti di vetro interpretabili come lenti in diversi siti: in particolare a Tiro ("lenti" biconvesse risalenti a circa il 300 a.C.), a Pompei[141] e nel Fayûm ("lenti" piano-convesse risalenti all'età imperiale).[142] Ricordiamo che in epoca ellenistica non solo si fondano l'ottica fisiologica e lo studio della rifrazione, ma si rinnova anche la produzione del vetro.[143]

Se realmente in epoca ellenistica furono usate lenti non solo per cauterizzare e accendere il fuoco (come è documentato) ma anche come lenti di ingrandimento (il che richiede una qualità migliore sia di vetro che delle tecniche di molatura[144]), certamente il loro uso non fu generalizzato. In questa ipotesi si potrebbe immaginare che i Romani, attratti da tutti gli oggetti "riservati", in cui vedevano uno "status symbol", ne avessero fatto un oggetto di lusso. Una conferma indiretta a questa ipotesi è il famoso monocolo di smeraldo di Nerone.[145] Probabilmente si trattava di una "lente naturale" (gli smeraldi possono facilmente presentare scissioni concoidi che originano la forma lentico-

[138] Cfr. Aristofane, *Nuvole*, 840-850.

[139] Teofrasto, *De igne*, fr. 73. Nel frammento di Teofrasto si parla certamente della possibilità di accendere un fuoco facendo convergere i raggi solari. Mi sembra però che non sia chiaro se si allude a una convergenza ottenuta con una lente o con uno specchio concavo; poiché si accenna sia al vetro, sia al bronzo e all'argento, si può pensare che Teofrasto si riferisca a entrambe le possibilità.

[140] Plinio, *Naturalis historia*, XXXVII, 28-29.

[141] Pompei aveva particolari legami con Alessandria. Tra le varie prove dell'influenza alessandrina (industrie tipiche alessandrine fiorite a Pompei, oggetti ritrovati a Pompei di chiara provenienza alessandrina, come una statuetta indiana, ecc.) Rostovzev ricorda che nel tardo II secolo a. C. fu costruito a Pompei un tempio a Iside ([Rostovzev SESME], vol.II, p. 353).

[142] Cfr. [Kisa], pp. 357-359; [Ovio oculistica]. La conclusione di Ovio, che riporta anche diverse fonti classiche in cui sembra che si accenni all'uso di lenti di ingrandimento, è però che non si trattasse di vere lenti.

[143] Tra l'altro si introduce la soffiatura. Particolari qualità di vetro prodotte ad Alessandria sono state trovate anche in Cina.

[144] Un indizio sul livello della tecnologia ellenistica in questo settore può essere fornito dalla capacità di trattare superfici metalliche, documentata dai ritrovamenti di pompe con cilindri rivestiti di piombo (cfr. sopra, p. 133 e n. 62). Per il recupero moderno di queste tecniche cfr. avanti, p. 304, n. 67.

[145] Cfr. Plinio, *Naturalis historia*, XXXVII, 64.

lare) ma i ritrovamenti archeologici prima accennati suggeriscono che potrebbe anche trattarsi di una versione particolarmente lussuosa di un oggetto prodotto più spesso in vetro.

Ruggero Bacone (che, come abbiamo notato nella n. 35 del capitolo terzo (pp. 85-86), sembra conoscere parti dell' *Ottica* di Tolomeo che non ci sono giunte) nell' *Opus Majus* parla con entusiasmo della capacità degli "Antichi" di ingrandire gli oggetti piccoli e di avvicinare quelli lontani con opportune combinazioni di lenti e specchi, ma non riesce a esporre una teoria ragionevole neppure nel caso di una lente singola.

In alcune miniature medievali sono rappresentati astronomi che osservano il cielo attraverso un lungo tubo; si è però in genere sostenuto che, poiché all'epoca non esistevano cannocchiali, dovesse trattarsi di tubi vuoti.[146]

[146] Alcuni hanno pensato che un "tubo" rappresentato nelle miniature con un treppiedi potesse essere usato come strumento didattico per individuare gli astri: in una lezione di astronomia, cioè, l'insegnante, facendo osservare gli allievi attraverso lo stesso strumento ben fisso, avrebbe potuto essere certo che tutti guardassero lo stesso corpo celeste. Peccato che nella stessa serie di miniature il maestro sia rappresentato anche mentre porge a un allievo un "tubo" senza alcun treppiedi. Price pensa che non si possa escludere che si trattasse realmente di cannocchiali ([Price strumenti], pp. 603-604).

5. Le scienze mediche e le altre scienze empiriche

5.1. *La nascita dell'anatomia e della fisiologia*

Tra le scuole mediche della Grecia classica la più notevole fu quella fondata nel V secolo a.C. da Ippocrate di Cos, che svolse in particolare un importante ruolo nel liberare la medicina dalle pratiche magico-religiose e nel fondare la deontologia medica. Il pensiero ippocratico restava però nell'ambito della τέχνη, cioè della pratica professionale medica, che anzi sostanzialmente fondava, senza generare delle "scienze" autonome. La novità essenziale della medicina ellenistica fu la creazione, nella prima metà del III secolo a.C., dell'anatomia e della fisiologia basate sulla dissezione del corpo umano, a opera di Erofilo di Calcedonia, attivo ad Alessandria, e di Erasistrato di Ceo.

Anche in questo campo la tradizione ha privilegiato le opere ancora comprensibili durante il Medio Evo. Sono così rimaste sia le opere del greco classico Ippocrate che quelle di Galeno, del periodo imperiale, mentre si sono perduti tutti gli scritti ellenistici; in particolare nessuno dei trattati di Erofilo e di Erasistrato si è conservato. È però possibile ricostruire una parte dei loro risultati, sufficiente per individuarne il livello qualitativo, sulla base di frammenti e testimonianze. Dobbiamo a Heinrich von Staden un acuto lavoro di ricostruzione dei risultati di Erofilo di Calcedonia e della sua scuola, basato sull'analisi critica di tutte le testimonianze relative. [1]

Il quadro che ne risulta è impressionante. Partendo praticamente da zero, Erofilo creò un'anatomia e una fisiologia umane per molti aspetti "moderne". Molti concetti e termini anatomici tuttora usati risalgono direttamente a lui. Fu Erofilo a fornire,

[1] [von Staden].

tra l'altro, la prima descrizione del fegato e dell'apparato digerente, distinguendo in particolare i vari tratti dell'intestino e dando loro alcuni dei nomi ancora usati, come quelli di duodeno e di digiuno.[2]

Le scoperte più interessanti furono probabilmente quelle sul sistema nervoso. Bisogna ricordare che prima di Erofilo la funzione del cervello non era stata chiaramente individuata: alcuni l'avevano intuita correttamente, ma Aristotele aveva pensato che consistesse nel raffreddare il sangue.[3] Inoltre si ignorava l'esistenza dei nervi. Erofilo non solo descrisse per primo l'anatomia del cervello, ma, soprattutto, scoprì i nervi[4] e, comprendendone la funzione, li distinse tra sensori e motori. Sappiamo che tra le coppie di nervi encefalici descritti da Erofilo vi erano i nervi ottico, oculomotore, trigemino, motore del trigemino, facciale, acustico e ipoglosso.[5]

Erofilo contribuì anche alla fondazione dell'anatomia vascolare (che deve molto anche a Erasistrato). Oltre a descrivere le cavità del cuore e le valvole cardiache,[6] egli individuò e descrisse per primo le differenze anatomiche tra arterie e vene (la cui distinzione funzionale risaliva al suo maestro Prassagora di Cos). L'introduzione di termini specifici quali quello di *calamo* per la cavità presente alla base del quarto ventricolo cerebrale o di *torcular Herofili* per la confluenza dei quattro seni venosi craniali dà un'idea del livello di accuratezza della sua descrizione dell'apparato circolatorio. Contributi dello stesso livello egli dette allo studio del sistema respiratorio e dell'apparato riproduttivo: dobbiamo a Erofilo, in particolare, sia la scoperta delle ovaie e delle cosiddette *tube di Falloppio* che un'accurata descrizione dei dotti spermatici (l'epididimo, ad esempio, fu scoperto da lui, che gli diede il nome ancora usato).

Particolare attenzione Erofilo aveva dedicato all'occhio, unico organo al quale avesse dedicato un trattato specifico. Si deve a lui la prima descrizione della retina, cui dette il nome attuale, e di altre tre membrane, probabilmente da identificare con la sclera, l'iride e la coroide.

Si può immaginare che se uno studioso di anatomia o di fisiologia potesse leggere le opere di Erofilo proverebbe una sensazione in parte analoga a quella che un matematico prova leg-

[2] Il duodeno deve il nome alla lunghezza (di dodici dita), mentre il digiuno fu chiamato così perché si svuota rapidamente.

[3] Aristotele, *De partibus animalium*, II, 7, 652a, 24-653a, 36.

[4] Tale scoperta è dimostrata in [Solmsen].

[5] Cfr. Galeno, *De anatomicis administrationibus*, 9.9 = test. 82 [von Staden].

[6] Secondo Galeno le valvole cardiache erano state però descritte in modo più accurato da Erasistrato.

gendo Euclide o Archimede: al di là delle differenze con le conoscenze attuali, le riconoscerebbe cioè come trattati della propria disciplina, sensazione che né il corpus ippocratico, né le opere di Aristotele, né alcun altro testo precedente gli potrebbe certo dare.

Erofilo si occupò anche di medicina in senso stretto, cioè di patologia, diagnostica e terapeutica. Egli introdusse, in particolare, quello che per oltre duemila anni rimase il principale strumento di diagnosi: la misura della frequenza del battito. Erofilo aveva notato sia la correlazione tra frequenza del battito e temperatura corporea che la variazione della frequenza media con l'età. Per misurare la febbre dei suoi pazienti si era fatto costruire pertanto, secondo quanto riferisce Marcellino, un orologio ad acqua tarabile in base all'età del malato.[7] Poiché, come abbiamo visto a p. 122, in quegli stessi anni Ctesibio costruiva ad Alessandria orologi tarabili dello stesso tipo, non vi è alcun motivo per dubitare della testimonianza di Marcellino.

Senza elencare i tanti interessi patologici di Erofilo, notiamo solo che egli è stato, tra l'altro, il primo medico a descrivere i sintomi di malattie mentali.[8]

Quanto alla terapeutica, Erofilo da una parte afferma l'importanza della prevenzione, in particolare sottolineando l'utilità dell'esercizio fisico, e dall'altra prescrive rimedi di varia natura: diete (sulla cui importanza insiste anche a scopo preventivo), farmaci semplici di origine vegetale, animale e minerale, composizioni nuove, rimedi allopatici. Riferendosi evidentemente all'antichissima abitudine di affidarsi agli dei per la guarigione, Erofilo afferma che "sono le medicine le mani degli dei."[9] In alcuni casi, come in quello del colera, le testimonianze affermano che Erofilo rinunziava al trattamento, avendo evidentemente accertato l'inutilità di tutti i rimedi sperimentati: è forse la prova migliore della serietà della sua medicina.

5.2. *Rapporti tra medicina e scienza esatta*

La contemporaneità tra la nascita della scienza esatta e l'evidente salto di qualità realizzato nel campo della medicina dalla scuola fondata da Erofilo, salto di qualità che si è tentati di considerare la "nascita della medicina scientifica", pone con forza due questioni:

[7] Marcellino, *De pulsibus*, 11 = test.182 [von Staden].
[8] Celio Aureliano, *Celeres vel acutae passiones*, I, praef. 4-5 = test. 211 [von Staden].
[9] Cfr. [von Staden], p. 417.

1. Quali sono le caratteristiche del lavoro di Erofilo che ce lo fanno apparire tanto più "scientifico" della medicina pre-ellenistica? È vero cioè, e in che senso, che l'anatomia, la fisiologia e la medicina di Erofilo sono "scienze"?

2. Qual è il rapporto tra l'ipotizzata nascita della medicina scientifica e quella della scienza esatta?

Cominciamo da alcune osservazioni sulla seconda questione. Oggi la storia della medicina ha in genere pochi rapporti con la storia della scienza esatta e la storia della tecnologia, che anche interagiscono poco tra loro. D'altra parte nessuna di queste discipline da sola può dare un'idea dell'unità della cultura ellenistica del III secolo, che non è stata mai più recuperata. È facile rendersi conto dell'interesse con cui Erofilo e i suoi discepoli seguivano i progressi della scienza esatta e della tecnologia. Vedremo che questo interesse si esprimeva anche nella scelta dei termini anatomici. La collaborazione con gli altri scienziati doveva essere feconda in ambedue i sensi. Sembrano probabili, in particolare, le interazioni tra i medici e Ctesibio. Sappiamo che Ctesibio aveva costruito un orologio su cui era possibile leggere le ore nella loro durata variabile, cambiandone la taratura ogni giorno, e vediamo Erofilo usare, ad altro scopo, un orologio dello stesso tipo. Sappiamo che Ctesibio introduce per primo la valvola e vediamo Erasistrato ed Erofilo descrivere le valvole cardiache. Nella *De historia philosopha* pseudo-galenica è scritto:

> Erofilo ammette una capacità motoria nei nervi, arterie e muscoli. Egli pensa che il polmone abbia una tendenza a dilatarsi e a contrarsi. La naturale attività del polmone, egli dice, è l'aspirazione dell'aria dall'esterno [...]. [10]

Oggi può sembrare banale l'azione aspirante dovuta alla dilatazione, ma questo concetto si stava probabilmente chiarendo ad Alessandria proprio in quegli anni, grazie appunto a Ctesibio,

[10] Pseudo-Galeno, *De historia philosopha*, 103 = test. 143c [von Staden]. Ho tradotto con *aria* il termine greco πνεῦμα che, avendo un'estensione semantica molto vasta (soffio, alito, respiro, spirito,...), è in genere conservato in greco. Erone, però, all'inizio della sua *Pneumatica*, afferma che il πνεῦμα non è altro che aria in moto (*Pneumatica*, I, proemio, 6, 6-7). Il significato concreto dato al termine πνεῦμα da Erone potrebbe essersi precisato proprio ad Alessandria, attraverso l'uso che di questo termine avevano fatto scienziati come Erofilo (ad esempio in questo passo) e Ctesibio, fondatore della *pneumatica*. La traduzione con *aria*, anche se non rende tutto il significato della parola, nel contesto autoesplicativo del frammento mi sembra il male minore, giacché almeno evita di dare al testo un'aria misteriosa, e di suggerire una direzione di pensiero esattamente opposta a quella di Erofilo.

che costruiva le prime pompe aspiranti.[11] Le descrizioni degli apparati circolatorio e respiratorio appaiono quindi connesse ai contemporanei progressi della nuova scienza della pneumatica.

La relazione tra medicina e meccanica dei fluidi può far nascere il sospetto che i medici potrebbero avere contribuito indirettamente alla pneumatica. Non potrebbero essere state le descrizioni della fisiologia del cuore e delle valvole cardiache ad aver suggerito a Ctesibio la pompa aspirante e premente basata sull'uso della valvola?[12] L'interesse e la capacità di Erofilo in quella che oggi chiameremmo "fisica" sono del resto dimostrati dal suo lavoro sul battito. Bisogna tener presente che la sua misura della frequenza del battito è con ogni probabilità il primo esempio in assoluto della misura di intervalli temporali dell'ordine del secondo. Non vi erano termini nella lingua greca per indicare intervalli di tempo così piccoli ed egli dovette inventarsi l'unità di misura temporale: scelse la durata media del battito di un neonato. Particolarmente interessante è l'uso di concetti matematici nella teoria delle pulsazioni: Erofilo analizzava i ritmi cardiaci (cioè i rapporti tra durata della sistole e durata della diastole) distinguendo quelli razionali da quelli irrazionali. Purtroppo sappiamo di questa terminologia solo da un passo molto oscuro del medico di età imperiale Rufo Efesio.[13] Le affermazioni di Rufo Efesio sono evidentemente contraddittorie: egli afferma che secondo Erofilo la sistole e la diastole dei neonati hanno eguale durata e allo stesso tempo che il loro rapporto è irrazionale. Forse l'idea di Erofilo era quella che nei neonati il ritmo cardiaco sia un numero molto vicino a 1 ma non coinci-

[11] Non sembra che questo concetto sia chiaro ad Aristotele: egli afferma sì che quando il polmone si solleva l'aria vi affluisce, ma poiché afferma anche, inversamente, che quando si riempie d'aria esso si dilata, non è chiaro se e in che senso egli stabilisca un nesso causale tra i due fenomeni. Sembra che l'afflusso di aria sia attribuito, secondo l'impostazione teleologica aristotelica, alla natura porosa del polmone, sulla quale Aristotele insiste (*De partibus animalium*, III, 6, 669a). Può sembrare che l'uso antichissimo dei mantici dovesse essere sufficiente per una spiegazione "moderna" dell'aspirazione, ma il passo di Aristotele mostra che non è così. Ecco un esempio della distanza tra un prodotto della tecnologia prescientifica e un oggetto progettato scientificamente, quale la pompa di Ctesibio: solo nel secondo caso la realizzazione dello strumento è strettamente connessa a una chiarificazione teorica.

[12] La possibile interazione tra Erofilo e Ctesibio (suggerita soprattutto dal fatto che nel caso dell'orologio tarabile e in quello della valvola sembrano plausibili influenze in direzioni opposte) è compatibile con la datazione proposta per Erofilo da von Staden. Sappiamo infatti che Ctesibio era attivo all'epoca di Tolomeo II Filadelfo (283-246) e von Staden propone per la vita di Erofilo le date approssimative 330/320-260/250 ([von Staden], p. 50).

[13] Rufo Efesio, *Synopsis de pulsibus*, 4 = test. 177 [von Staden]. Il passo sulla razionalità dei ritmi cardiaci è discusso in [von Staden], pp. 280-282.

dente né con 1 né con alcun numero razionale semplice.[14] In ogni caso è interessante la familiarità di Erofilo con la terminologia relativa agli argomenti più avanzati presenti negli *Elementi* di Euclide. Erofilo introdusse nella teoria delle pulsazioni anche termini musicali e metrici, che usò in particolare per denominare i vari ritmi cardiaci. Anche l'interesse per la musica era condiviso da Ctesibio, che è l'inventore dell'organo idraulico. Da questi esempi emerge un'unità della cultura che si è perduta per millenni. Non solo infatti risultati e strumenti della scienza esatta erano usati in medicina, ma probabilmente accadeva anche il fenomeno inverso.

Sappiamo che l'unico organo sul quale Erofilo scrisse un trattato specifico è l'occhio. Poiché tutti i suoi interessi anatomici appaiono finalizzati alla comprensione della fisiologia, doveva trattarsi di un particolare interesse alla fondazione dell'ottica fisiologica. Tale interesse è contemporaneo allo sviluppo ad Alessandria della scienza dell'ottica. L'ipotesi di una stretta interazione tra i medici alessandrini e i fondatori dell'ottica può aiutare a capire alcuni passi dell'*Ottica* di Euclide che sono risultati oscuri fin dall'epoca imperiale.[15] Abbiamo visto, ad esempio, che Erofilo conosce la struttura "reticolare" della retina (come risulta chiaramente dalla sua scelta del nome). Una tale struttura può facilmente suggerire l'idea dell'esistenza di un insieme discreto di fotorecettori. Per costruire un modello matematico della visione, è allora naturale considerare un insieme discreto di "raggi visuali": uno per ciascun elemento strutturale attivo della retina. In questo modo si può formulare una teoria che spieghi quantitativamente il potere risolutivo dell'occhio umano. È esattamente ciò che fa Euclide, assumendo che i "raggi visuali" formino un insieme discreto, con una distanza angolare reciproca finita.[16] Gli studiosi moderni, non riconoscendo più nell'ottica classica un modello matematico dell'atto fisiologico della visione (anche a

[14] Non fosse cioè esprimibile con una frazione con denominatore sufficientemente piccolo. Ha senso dire che il rapporto a/b tra i valori misurati di due grandezze omogenee è razionale solo se tale rapporto è esprimibile con una frazione n/m con m abbastanza piccolo perché $1/m$ sia grande rispetto all'errore di misura sul rapporto. La terminologia di Erofilo diviene comprensibile se si suppone che egli condividesse l'osservazione precedente.

[15] La stretta relazione tra ottica e oftalmologia risulta anche dalla lettura di Archimede: nel passo dell' *Arenario* in cui Archimede discute la misura della grandezza apparente del Sole, una grandezza da lui misurata preliminarmente è infatti il diametro della pupilla ([Mugler: Archimède], tome II, p. 138).

[16] Euclide, *Ottica*; questo punto è già chiaro all'inizio dell'opera, nelle definizioni 1 e 7 e nella proposizione 1. In particolare la definizione 7 (secondo la quale l'accuratezza con cui un oggetto è visto dipende dal numero dei raggi visuali incidenti) mostra che la scelta di un modello discreto è dovuta all'esigenza di spiegare il limitato potere risolutivo dell'occhio. Euclide afferma che l'im-

causa della successiva totale assenza, per almeno due millenni, di modelli matematici di processi fisiologici), hanno considerato una "ipotesi falsa " la scelta di Euclide.[17]

5.3. *La nomenclatura anatomica e la pressa a vite*

L'analisi della nomenclatura anatomica introdotta da Erofilo può essere una fonte preziosa di informazioni, probabilmente non ancora esaurita. L'uso, ad esempio, della parola *faro* per indicare una struttura allungata (l'apofisi stiloide del temporale viene chiamata *faroide* da Erofilo) mostra il desiderio di introdurre termini aderenti alla nuova realtà tecnologica. *Faro* era infatti da molto tempo il nome di un'isoletta, ma il termine scelto da Erofilo allude evidentemente alla struttura che vi era stata da poco costruita.

Il termine *torcular Herofili*, usato per la confluenza dei seni venosi craniali, appare in questa luce particolarmente interessante. Il termine latino *torcular*, dal verbo *torquere*, suggerisce immediatamente, come i corrispondenti termini italiani torchio e torcere, il concetto di avvitamento, che è stato sempre considerato all'origine della scelta del nome. Poiché l'avvitamento dei quattro seni venosi, che il più delle volte manca nell'uomo, è sempre presente nel bue, alcuni hanno pensato che Erofilo in questo caso non si fosse basato su autopsie umane, ma sull'anatomia del bue. Come osservato da von Staden, la struttura "a vortice" non è però troppo rara nell'uomo.[18]

Il termine greco usato effettivamente da Erofilo è però ληνός,[19] di etimologia dubbia, ma che certamente non aveva in sé originariamente l'idea dell'avvitamento. ληνός significava

pressione di vedere gli oggetti in modo continuo deriva dai rapidi movimenti dell'occhio.

[17] Cfr. [Ovio: Euclide], p. 15 (dove è scritto che l'opinione di Euclide "fa sorridere") e p. 38; [Heath HGM], p. 442 (dove quella di Euclide è detta una "ipotesi falsa"). Opinioni simili sono state espresse da molti altri autori moderni che si sono occupati della questione (cfr., ad esempio, [Enriques de Santillana], [Heiberg GMNA], [Ronchi], [Ver Eecke]). Tutti gli studiosi citati hanno ritenuto "false" le affermazioni di Euclide sui "raggi visuali" che divergono dalle affermazioni sui "raggi di luce" accettate dall'ottica moderna. Oggi il termine "falso" non è più di moda, ma l'assunzione di Euclide continua ad apparire strana. Anche i contributi più recenti che hanno riconosciuto nell'ottica euclidea una teoria della percezione visiva (cfr. [Jones A.] e i lavori lì citati) sembrano averne trascurato la relazione con l'oftalmologia ellenistica. Una discussione su questo punto è in [Russo 7].

[18] [von Staden], p. 158.

[19] Come risulta da un passo di Oribasio (*Collectiones medicae*, 24.1.7-8 = test. 122b [von Staden]) e uno di Galeno (*De usu partium*, 9.6 = test. 123 [von Staden]).

infatti sia un recipiente per contenere dei liquidi (*tino*, ma anche *abbeveratoio*) sia qualsiasi tipo di pressa. Il termine fu poi usato per i torchi, ovviamente dopo la loro invenzione. È molto improbabile che la traduzione in *torcular* abbia potuto introdurre casualmente la forma di una struttura presente a volte nell'uomo e sempre nel bue, anche perché l'anatomia del bue doveva essere nota a Erofilo ancor più di quella umana[20] e la prima traduzione del termine in latino fu fatta certamente quando la scuola di Erofilo era perfettamente in grado di controllarne l'accuratezza.

Sembra quindi probabile che quando Erofilo scelse il termine ληνός questo termine avesse già assunto il significato di *torchio*.

Dobbiamo dedurne che probabilmente all'epoca di Erofilo, cioè nella prima metà del III secolo a.C., esistessero già dei torchi, cioè delle presse a vite. L'assenza di riferimenti a questo strumento (e anche a qualsiasi altro tipo di coppia vite-madrevite) nella letteratura dell'età classica, unita alla particolare attenzione di Erofilo ai progressi tecnologici, che abbiamo già notato, suggerisce la possibilità che si trattasse di un'invenzione dei suoi tempi. La più antica descrizione sopravvissuta della pressa a vite è quella, successiva di secoli, di Erone di Alessandria,[21] mentre Plinio ne parla come di una novità della sua epoca.[22]

Le considerazioni precedenti sembrano confermare sia la tesi che la tecnologia descritta da Erone risalga in realtà al III secolo a.C.[23] sia l'inattendibilità di Plinio, che presenta come invenzioni recenti tutti i prodotti ellenistici che ai suoi tempi da poco avevano cominciato ad essere importati a Roma.

5.4. *La metodologia scientifica in medicina*

Tornando al problema del rapporto tra scienza esatta e medicina, osserviamo che l'intelligenza, la cultura e l'uso strumentale di risultati della scienza non bastano certo per definire *scientifico* il lavoro di Erofilo. Per questo dobbiamo chiederci se e in quale misura egli condividesse con gli esponenti della

[20] Quasi tutte le conoscenze di anatomia precedenti Erofilo erano basate sul bue, la cui anatomia era ben nota anche ai sacerdoti, che usavano sacrificare tali animali. L'impossibilità, per motivi religiosi, di sezionare il corpo umano aveva costretto i "medici" a basarsi soprattutto su analogie tra uomo e bue.

[21] Erone, *Meccanica*, III, ii, 19-21.

[22] Plinio, *Naturalis historia*, XVIII, 317.

[23] Cfr. sopra, §4.9.

scienza esatta ellenistica non solo strumenti tecnici e terminologia, ma anche elementi metodologici.

Notiamo innanzitutto che la dissezione di cadaveri costituisce una novità assoluta rispetto alla "medicina" precedente, in quanto per la prima volta si agisce su un corpo umano non per curarlo, per imbalsamarlo o per qualsiasi altro fine pratico immediato, ma a puro scopo di conoscenza. Sappiamo inoltre da Celso che Erofilo era rifornito dal sovrano anche di condannati da usare per esperimenti *in vivo*.[24] Nel lavoro di Erofilo sono quindi certamente presenti due caratteristiche tipiche delle "scienze empiriche": la separazione dall'attività professionale e il metodo sperimentale.

La fondazione dell'anatomia è basata sul superamento di due tabù presenti nella cultura greca classica. Il primo è di natura religiosa e ci è più evidente: riguarda la possibilità di sezionare il corpo umano. Il secondo tabù è di natura intellettuale ed è più profondo.

In tutta la cultura classica le discussioni sui concetti erano state inseparabili dalle discussioni sui termini che li designavano. L'antica concezione dei *nomi naturali* delle cose, ancora in parte presente in Platone,[25] era stata per la verità combattuta, in particolare da Aristotele,[26] che però aveva considerato una libera scelta umana solo la particolare struttura fonetica delle parole e non l'individuazione degli oggetti "nominabili". Nel *De partibus animalium*, ad esempio, è sempre scontato che le "parti" di cui si può parlare abbiano un nome in greco. Si suppone cioè, implicitamente, l'esistenza statica di un insieme finito formato da tutti gli oggetti conoscibili, corrispondente al lessico greco (o di un'altra lingua). Anche Democrito, che pure aveva offerto diverse dimostrazioni dell'origine convenzionale dei nomi, non sembra aver superato questa concezione,[27] che

[24] Celso, *De medicina*, proemio, 23-6 = test. 63a [von Staden]. La testimonianza di Celso è considerata attendibile da von Staden, che osserva tra l'altro che non è possibile stabilire se un nervo è sensore o motore, come Erofilo fece sistematicamente, senza esperimenti *in vivo* ([von Staden], p.153). I problemi etici sollevati da queste pratiche sono certamente molto gravi; d'altra parte essi ci appaiono così attuali da confermare, mi sembra, la vicinanza metodologica tra Erofilo e il "metodo scientifico" moderno.

[25] Platone, *Cratilo*. Platone, anche se riconosce che le parole sono una creazione umana, insiste sull'oggettiva somiglianza tra un *buon* nome e l'oggetto nominato. Egli inoltre non ammette che uomini normali del suo tempo possano introdurre nuovi vocaboli, attribuendo la scelta dei nomi ai *legislatori* originari, che avrebbero creato le varie lingue.

[26] Aristotele, *De interpretatione*.

[27] Le dimostrazioni di Democrito sono riportate in un passo del commento di Proclo al *Cratilo* di Platone (Democrito, fr. 26 [Diels]). Queste dimostra-

nell'età moderna ha cominciato a cedere solo nel XVII secolo. Tullio De Mauro ha scritto a questo proposito:

> A partire dal secolo XVII, metodo sperimentale e classificazioni rivelano alla più avanzata cultura europea che vi sono cose conoscibili scientificamente [...] senza che tali cose abbiano mai avuto un loro nome né nella "perfetta" lingua latina né in altre lingue.[28]

La libertà con cui Erofilo introduce la sua nomenclatura anatomica (del tutto analoga a quella con cui i matematici ellenistici, da Euclide in poi, introducono nuovi termini matematici[29]) sarebbe stata quindi inconcepibile non solo nella Grecia classica ma anche, dopo il declino dell'ellenismo, fino al XVII secolo. Si deve osservare che la più avanzata cultura europea del XVII secolo, di cui parla De Mauro, da alcuni secoli stava studiando intensamente opere ellenistiche, che contenevano sia le idee delle classificazioni e del metodo sperimentale, sia il ricordo di scienziati come Erofilo, che avevano individuato nuovi oggetti di studio dando loro per la prima volta un nome.

L'idea di una terminologia convenzionale non è quindi affatto banale. La terminologia anatomica, in particolare, lo è molto meno, ad esempio, di quella della zoologia sistematica. Mentre infatti le nuove specie zoologiche sono abbastanza facilmente individuabili come tali, vi è molta più libertà nello scegliere quali strutture anatomiche siano meritevoli di un nome.

Quando Erofilo, scegliendo nella struttura continua ed enormemente complessa del sistema circolatorio le particolarità morfologiche meritevoli, ai fini fisiologici e patologici che lo interessano, di un nome specifico, introduce nuovi termini come quelli di *calamo* o di *torchio*, egli crea dei nuovi concetti. Erofilo, con la sua anatomia, crea cioè una nuova disciplina in cui non solo i vocaboli usati ma anche i concetti corrispondenti sono consapevoli creazioni.

È questa, mi sembra, l'origine di quell'impressione di "scientificità" che si ha leggendo le citazioni anatomiche di Erofilo,

zioni, oltre che sull'esistenza di omonimi e di sinonimi, sono basate sulla possibilità di cambiare i nomi; l'unico esempio a questo proposito riguarda però un nome proprio. Sarebbe difficile spiegare come mai in questo contesto un convenzionalista come Democrito non accenni alla creazione di termini convenzionali se questa possibilità fosse stata già usata ai suoi tempi.

[28] [De Mauro], p. 52.

[29] Abbiamo già notato nel §2.8 come Euclide introduca un nuovo vocabolo per il concetto di punto. L'uso di definire concetti matematici usando per essi nomi nuovi e convenzionali è sistematico in Archimede (cfr., ad esempio, la terminologia geometrica introdotta nell'opera *Sui conoidi e gli sferoidi* o quella aritmetica introdotta nell'*Arenario*) e in Apollonio di Perga (cui dobbiamo, tra l'altro, i termini ancora usati di *ellissi*, *parabola* e *iperbole*).

che ci appaiono tanto diverse dalle discussioni "anatomiche" di Aristotele.

L'uso di concetti teorici specifici, consapevolmente creati, è in effetti una delle caratteristiche essenziali che avevamo individuato nelle "teorie scientifiche". Ma le teorie scientifiche che abbiamo descritto nel terzo capitolo, che si andavano formando nella "scienza esatta" all'epoca di Erofilo, erano anche caratterizzate dall'essere:

– basate su dati empirici, senza esserne determinate univocamente;

– certe al loro interno, grazie a una struttura rigorosamente deduttiva;

– applicabili a problemi concreti, mediante "regole di corrispondenza" prive di validità assoluta.

I punti precedenti hanno analogie nell'anatomia e nella medicina di Erofilo? Per cercare di rispondere a questa domanda dobbiamo basarci sulle testimonianze concernenti la metodologia scientifica di Erofilo. Purtroppo in questi passi, risalenti al periodo imperiale, gli autori delle citazioni, e in particolare Galeno, non sembrano in grado di apprezzare la profondità concettuale della loro fonte.

Le testimonianze non lasciano dubbi sul fatto che Erofilo considerasse essenziali le basi empiriche della conoscenza. Galeno, ad esempio, scrive:

> We find, however, that this Herophilus concedes no small importance to experience, nay indeed, to speak the truth (and it is the fittest to be spoken), he makes experience all-important. [30]

È anche chiaro che per Erofilo il dato empirico è solo un punto di partenza: le "apparenze" da cui si parte dovranno essere poi "spiegate" da una teoria nella quale avranno il ruolo di effetti. Su questo punto è particolarmente significativa la testimonianza dell'opera medica del cosiddetto *Anonimo londinese*:

> come osserva [...] Erofilo dicendo: "siano descritte per prime le apparenze (φαινόμενα), anche se non sono prime". [31]

A proposito della formazione del feto, Galeno scrive:

> [Erofilo] infatti reputa che le descrizioni anatomiche non producano alcun presupposto della conoscenza in base al quale [si possa] dire "questa parte si è generata da quest'altra", come alcuni, frainten-

[30] Galeno, *De experientia medica*, 13.6 = test. 52 [von Staden]; la traduzione (dalla versione araba del testo greco perduto) è di Richard Walzer. Ho preferito evitare traduzioni di terza mano.

[31] P. Londinensis 137 = test. 50a [von Staden], 3-4.

dendo, credono; [egli pensa] che le facoltà che ci governano vengano scoperte sulla base di altre "apparenze" (φαινόμενα) e non semplicemente osservando le parti.[32]

Le "apparenze" (o "fenomeni") che interessano Erofilo non sono quindi solo dati morfologici e non determinano meccanicamente la teoria; tra questi "fenomeni" vi sono quelli che possiamo chiamare dati sperimentali, come è chiaro nel caso delle pulsazioni, delle quali Galeno scrive:

i battiti, sui quali Erofilo, che fece un resoconto di osservazioni ed esperimenti più che insegnare un metodo razionale, parlò più a lungo.[33]

A Galeno il metodo sperimentale appare contrapposto alla razionalità, considerata propria, evidentemente, delle esposizioni puramente deduttive.[34] È divertente notare che Polibio sembra criticare Erofilo per il motivo opposto:

La parte razionale [della medicina] [...] ha le sue origini soprattutto da Alessandria, da quelli che sono detti erofilei e callimachei, [...] ma se riportate questi [medici razionali] alla realtà e gli mettete un paziente tra le mani, scoprite che valgono così poco nel loro lavoro come coloro che non hanno letto neppure un trattato medico.[35]

Se Erofilo, nonostante l'opinione citata di Galeno, è considerato un fondatore della "medicina razionale" (che Polibio contrappone alla "medicina empirica") evidentemente l'aspetto deduttivo della "teoria" non era assente nelle sue opere. A Erofilo era però chiaro che le teorie non possiedono un valore assoluto di verità, come si può dedurre dai passi seguenti di Galeno:

Alcuni dicono che di nulla esiste una causa; altri, come gli Empiristi, sono in dubbio tra il sì e il no, ma altri ancora, come Erofilo, la accettano ipoteticamente, [...][36]

Mentre Erofilo mette in dubbio ogni causa con molte e forti ragioni, si scopre poi che egli stesso le usa.[37]

[32] Galeno, *De foetuum formatione*, 5 = test. 57 [von Staden], 4-9.
[33] Galeno, *De praesagitione ex pulsibus*, II, 3 = test. 53 [von Staden], p. 126.
[34] Questa opinione di quello che è in genere considerato il massimo medico dell'Antichità, insieme alla constatazione che ci restano le opere di Galeno ma non quelle di Erofilo, contribuisce a chiarire perché nelle poche opere rimaste dell'antica scienza non abbiamo molti esempi di uso del metodo sperimentale.
[35] Polibio, *Storie*, XII, 25 d.
[36] Galeno, *De causis procatarcticis*, 13.162 = test. 58 [von Staden],1-3. L'espressione che ho tradotto *ipoteticamente* è *ex suppositione*.
[37] Galeno, *De causis procatarcticis*, 16. 197-204 = test. 59a [von Staden], 2-4.

Quest'ultima sembra una contraddizione a Galeno, che, distinguendo solo tra vero e falso, non può capire l'uso consapevole da parte degli scienziati ellenistici di modelli teorici, cioè di *teorie* basate su *ipotesi*. Erofilo sottolinea come la percezione sia l'unico elemento certo della conoscenza:

> Cosa dice [Erofilo]? "È per natura impossibile accertare se esistano o meno cause; posso però valutare di essere raffreddato, riscaldato, nutrito e dissetato" .[38]

> Egli [Erofilo] dubiterà anche in un altro modo facendo le seguenti distinzioni: "chi vede ha la sensazione di ciò che è visto o, essendo fermo, di un oggetto fermo o, in moto, di un oggetto fermo o, in moto, di un oggetto in moto oppure, fermo di un oggetto in moto". Mostrando poi che non è convincente spiegare la percezione secondo nessuna delle affermazioni precedenti, egli nega la nostra possibilità di vedere in alcun modo.[39]

L'ultimo passo, che si riferisce evidentemente alla relatività del moto, è particolarmente illuminante. La possibilità di spiegare le stesse "apparenze" con diverse "ipotesi" sullo stato di moto dell'osservatore e dell'oggetto osservato era usata da Erofilo a fini epistemologici, per illustrare come la stessa fenomenologia potesse dar luogo a diverse spiegazioni, delle quali nessuna poteva pretendere al titolo di unica "verità"[40]; tutte erano egualmente accettabili, purché se ne potessero dedurre le impressioni visive realmente percepite. Galeno (attivo in un'epoca in cui molti dei concetti usati da Erofilo, tra i quali quello della relatività del moto, erano stati dimenticati) fraintende la fonte, attribuendo a Erofilo un'affermazione assurda. Ancora una citazione di Galeno:

> Erofilo e i suoi seguaci affermano che la prognosi è assolutamente certa, mentre la previsione non lo è affatto.[41]

[38] "Quid igitur [Herophilus] ait? 'causa vero, utrum sit vel non, natura quidem non est invenibile, existimatione autem puto infrigidari, estuari, cibo et potibus repleri'" (Galeno, *ibid.*, 7-9). Von Staden interpreta diversamente, traducendo "...it is through a supposition that I think I am chilled...". Mi sembra però che il termine originale tradotto con il latino *existimatione*, riferendosi alla percezione di sensazioni come quelle di freddo o di sazietà e contrapponendosi all'impossibile accertamento delle cause, non dovesse avere per Erofilo una valenza limitativa (anche se sembra averla per Galeno). Notiamo che Sesto Empirico (che, tra l'altro, anche perché medico, doveva conoscere bene le opere di Erofilo) usa proprio le sensazioni di caldo e di freddo come esempio di dati di fatto ai quali anche gli scettici danno il loro assenso (*Lineamenti del Pirronismo*, I, 13).

[39] Galeno, *ibid.*, 40-45.

[40] Abbiamo già osservato a p. 106 che l'affermazione che le *apparenze* viste dipendono solo dal moto relativo è nell' *Ottica* di Euclide, opera che probabilmente era ben conosciuta da Erofilo.

[41] Galeno, *In Hippocratis prognosticum*, I, comment. I.4 = test. 264 [von Staden], 1-2.

Galeno (che ritorna sulla questione in altri due passi) continua sostenendo l'assurdità della distinzione erofilea. Si può pensare che Erofilo avesse affermato che le condizioni osservabili del paziente, insieme alla dottrina medica accettata, determinino una prognosi che è *certa*, nel senso che, in linea di principio, è condividibile da tutti i medici, ma alla quale corrisponde un decorso variabile della malattia. In altre parole la prognosi è un concetto interno alla teoria ed è quindi determinabile con certezza, mentre le "regole di corrispondenza" che permettono di applicare la teoria al caso concreto, associando alla prognosi una previsione, non hanno alcuna garanzia assoluta di validità.

In definitiva, l'impressione di "scientificità" data dai risultati di Erofilo è pienamente confermata sul piano metodologico. Erofilo, per l'introduzione del metodo sperimentale in medicina, per il contributo dato a una nuova concezione della lingua e soprattutto per la sua consapevolezza metodologica emerge dalle testimonianze rimasteci come uno dei fondatori del metodo scientifico.

5.5. *Sviluppo e fine della medicina scientifica*

Anche se finora abbiamo descritto la nascita della medicina scientifica come dominata dalla personalità di Erofilo, non si tratta affatto di una personalità isolata. Lo sviluppo della medicina nel III secolo a.C. non si limitò al lavoro di pochi individui eccezionali, ma ebbe una notevole ricaduta sulla comune pratica professionale. Il moltiplicarsi delle conoscenze portò alle specializzazioni mediche: ad Alessandria non vi sono solo *medici*, ma anche, tra l'altro, dentisti e ginecologi. La medicina scientifica non fu, d'altra parte, un fenomeno limitato ad Alessandria; contemporaneo di Erofilo fu Erasistrato di Ceo, che probabilmente svolse la sua attività di medico ad Antiochia, alla corte di Seleuco I.[42] Quasi tutti i principali interessi scientifici di Erofilo, dalla dissezione anatomica alla neuroanatomia, dagli studi sul battito a quelli sull'oftalmologia, sembrano condivisi da Erasistrato, cui era stata attribuita anche la scoperta dei nervi e che secondo alcuni antichi autori avrebbe pure praticato la vivisezione. La natura frammentaria delle testimonianze rimaste rende spesso difficile confrontare i contributi dei due scienziati.[43]

[42] Cfr. [von Staden], p. 47.
[43] Per i frammenti di Erasistrato cfr. [Garofalo: Erasistrato].

Erofilo fondò una scuola che fu attiva fino al I secolo d.C. Tra i suoi discepoli diretti troviamo, secondo il racconto di Igino, la prima donna che osò sfidare l'esclusione del proprio sesso dalla professione medica: Agnodice.[44] Secondo Igino, in seguito al successo professionale di Agnodice la proibizione alle donne di esercitare la medicina fu abolita. È un esempio del ruolo svolto dalle donne nella civiltà ellenistica.[45]

Uno dei primi e più significativi rappresentanti della scuola di Erofilo fu Andrea, medico personale di Tolomeo IV Filopatore e forse discepolo diretto di Erofilo. Andrea, come il suo maestro, ebbe vasti interessi: si occupò certamente di farmacologia, chirurgia e fisiologia. Un passo di Celio Aureliano su un caso di *pantofobia* fa ritenere che egli abbia condiviso anche l'interesse di Erofilo per le malattie mentali.[46] Una macchina fatta costruire da Andrea per ridurre le lussazioni degli arti rimase famosa nei secoli successivi e testimonia le interazioni tra medici e meccanici alessandrini. Già con Andrea non vi è però alcuna testimonianza chiara sull'eventuale prosecuzione di quella che era stata la principale attività scientifica di Erofilo: la dissezione anatomica. Certamente quasi tutti i medici successivi della scuola non la praticarono.[47]

Un sintomo evidente della decadenza della scuola di Erofilo nei secoli successivi è l'importanza crescente assunta al suo interno dall'esegesi dei testi ippocratici. Ciononostante durante tutto l'arco della sua esistenza la scuola continuò a produrre scienziati che dettero importanti contributi allo sviluppo delle conoscenze, soprattutto scegliendo singoli campi di specializzazione. Ad esempio Demetrio di Apamea si occupò soprattutto degli organi sessuali, spostando il centro di interesse, che in Erofilo era stato in questo settore la descrizione della fisiologia della riproduzione, al trattamento di patologie. Un altro esponente della scuola, Mantia, fu probabilmente il maggiore farmacologo dell'antichità: sembra che sia stato il primo a preparare, descrivere e classificare medicine ottenute unendo molti componenti diversi.[48]

[44] Igino, *Fabulae*, fabula 274 = test. 8 [von Staden].

[45] Tra i pittori ellenistici menzionati da Plinio, ad esempio, vi sono cinque pittrici (Plinio, *Naturalis historia*, XXXV). I tardi esempi di Maria Giudea (cfr. avanti, p. 175) e di Ipazia fanno pensare che neppure l'attività scientifica fosse preclusa alle donne.

[46] Celio Aureliano, *Celeres vel acutae passiones*, III, 12.108; citato in [von Staden], p. 476.

[47] Sembra che l'unica eccezione sia stato Egetore.

[48] Plutarco afferma però che medicine ottenute componendo ingredienti minerali, vegetali e animali sarebbero state preparate da Erasistrato, che le avrebbe chiamate "mani degli dei" (*Quaest. conviv. libri vi, 663c)*. Ecco un al-

La vitalità della scuola di Erofilo ancora nel I secolo d.C. è testimoniata dal lavoro di uno dei suoi ultimi esponenti: Demostene Filalete. Questo medico, che aveva scritto anche un'opera sulla teoria delle pulsazioni, si dedicò soprattutto all'oftalmologia. I quaranta passi che lo citano gli attribuiscono lo studio e la cura di più di quaranta diverse affezioni dell'occhio, dal calazio al glaucoma, molte delle quali probabilmente mantengono il nome da lui assegnato. L'opera scritta da Demostene Filalete rimase la base delle conoscenze oculistiche in tutto il Medio Evo.

Con il I secolo d.C. la scuola di Erofilo si estingue. La successiva decadenza metodologica, che abbiamo già notato in Galeno, è ancora più evidente in un altro dei massimi medici dell'epoca imperiale: Rufo Efesio. Nel suo trattato sulla terminologia anatomica, *De nominatione partium hominum* (che è per noi una preziosa testimonianza su Erofilo) egli riporta scrupolosamente tutti i termini anatomici a lui noti, indicandone anche l'origine. La terminologia di Rufo Efesio è però particolarmente esuberante su argomenti inessenziali: ad esempio i peli del viso[49]; ciò dipende evidentemente dall'atteggiamento passivo verso la terminologia esaminata, che diviene ricchissima proprio riguardo agli oggetti che, come le barbe, sono nominati quotidianamente. Rufo Efesio non solo non compie alcun tentativo di standardizzare la nomenclatura precisando l'uso di termini ambigui, ma critica dei termini coniati dagli scienziati alessandrini in quanto introdotti da "medici egizi" non abbastanza conoscitori della lingua greca.[50] Anche gli altri medici di età imperiale criticano spesso la lingua di Erofilo, di cui non possono più comprendere l'aspetto creativo. Celio Aureliano, ad esempio, nel passo già citato in cui riporta la descrizione di Erofilo di un caso di malattia mentale, usa i termini latini *deliratio* e *alienatio* per tradurre due dei termini usati da Erofilo nel suo lavoro pionieristico sulla psichiatria; subito dopo egli rimprovera Erofilo per avere dato ai due termini significati diversi, senza rendersi conto che si trattava in realtà di sinonimi.[51]

Per gli uomini la lingua era ormai ridivenuta un dato esterno su cui non si era più in grado di intervenire se non inconsapevolmente e questo è un aspetto importante della morte del "metodo scientifico".

tro esempio di come le tradizioni riguardanti le scuole di Erofilo e di Erasistrato si siano fuse.

[49] Rufo Efesio, *De nominatione partium hominum*, 139, 8 sgg.

[50] Rufo Efesio, *De nominatione partium hominum*, 151, 1 sgg.

[51] Celio Aureliano, *Celeres vel acutae passiones*, I, praef. 4-5 = test. 211 [von Staden].

5.6. *Botanica e zoologia*

Lo studio della zoologia e della botanica ebbe un notevole impulso dalle conquiste di Alessandro, che resero possibile lo studio sistematico di molte specie animali e vegetali mal conosciute o del tutto ignote ai Greci dell'età classica. Già Alessandro stesso si era preoccupato, in particolare durante la sua spedizione in India, di mandare in patria campioni di flora e fauna dei paesi che attraversava perché fossero studiati.

La botanica e la zoologia ellenistiche avevano un importante presupposto nelle ricerche di Aristotele. L'impostazione teleologica aristotelica non impediva infatti in questo settore il raggiungimento di risultati interessanti. Mentre, come abbiamo già notato, l'anatomia di Aristotele è bloccata dalla sua concezione statica della lingua, questo problema è meno grave per la zoologia, per la quale i nomi greci degli animali fornivano uno schema concettuale abbastanza adeguato. Aristotele non solo descrisse circa 500 specie animali sulla base di osservazioni spesso dirette, che spaziavano dalla morfologia al comportamento,[52] ma, riconoscendo che le forme di vita animale variano con continuità da una specie all'altra, introdusse anche uno schema di "classificazione naturale" degli animali.[53]

Il successore di Aristotele alla guida del Liceo, Teofrasto, che era stato per decenni l'allievo prediletto di Aristotele, si dedicò, tra l'altro, alla meteorologia, alla mineralogia e, soprattutto, alla botanica. I due trattati botanici rimastici, l' *Historia plantarum* e il *De causis plantarum*, contengono elementi di una "teoria" (nel senso delle scienze empiriche) di fisiologia vegetale, basata sia sulla raccolta di antiche conoscenze empiriche sia su osservazioni ed esperimenti recenti.

Teofrasto discute a lungo dei cambiamenti che possono avvenire negli esseri viventi da una generazione all'altra.[54] Le variazioni morfologiche delle piante dovute a mutamenti di suolo o di clima sono distinte con chiarezza dai cambiamenti spontanei; Teofrasto sottolinea che le mutazioni di questo secondo tipo, che avvengono sia nelle piante che negli animali, non avvengono nell'individuo formato, ma nel seme,[55] sono ereditarie e possono portare a modifiche graduali nel corso di molte generazioni.[56]

[52] Aristotele, *Historia animalium*. Molte osservazioni sono anche nelle altre opere zoologiche.

[53] Sui criteri di classificazione aristotelici, oltre alla *Historia animalium*, è importante il I libro del *De partibus animalium*.

[54] Teofrasto, *Historia plantarum*, II, iii.

[55] Teofrasto, *De causis plantarum*, IV, 4.11.

[56] Teofrasto, *De causis plantarum*, II, 13.3.

Particolarmente interessanti sono le critiche di Teofrasto al finalismo aristotelico.[57] Su quest'ultimo argomento il passo più interessante non si trova però nelle opere di Teofrasto, ma, abbastanza sorprendentemente, in quelle dello stesso Aristotele. Si tratta del passo del secondo libro della *Fisica* in cui, con grande chiarezza, viene esaminata la possibilità di sostituire l'impostazione teleologica della biologia aristotelica con il principio della selezione naturale:

> Ma sorge una difficoltà: nulla impedisce alla natura di agire non con un fine e per il meglio, bensì come piove Zeus, non per far crescere il frumento, ma per necessità [...]
> Cosicché nulla impedisce che anche le parti [degli esseri viventi] si abbiano allo stesso modo e che, ad esempio, per necessità i denti incisivi si formino affilati e adatti a tagliare, quelli molari, invece, piatti e utili a triturare il cibo; ma che ciò non avvenga per tali fini, ma accada a caso. E sia così anche per le altre parti nelle quali sembra esservi un fine.
> E dunque nei casi in cui tutto è accaduto accidentalmente, ma come se fosse avvenuto per un fine, quegli esseri si sono salvati perché costituiti accidentalmente in modo opportuno; quelli, invece, per i quali ciò non è avvenuto, si sono estinti e si estinguono.[58]

La "difficoltà" viene poi rapidamente superata tornando alla spiegazione finalistica.

Il negare l'esistenza di vere cause finali, spiegando così chiaramente la corrispondenza tra struttura e funzione degli organi animali sulla base della selezione naturale, è così lontano dal pensiero aristotelico e in una questione in esso così centrale da far nascere dei sospetti.[59] La *Fisica*, come tutte le opere rimaste di Aristotele, consisteva di appunti destinati all'uso interno da parte dei membri della scuola e, come è provato in molti casi, tale uso non era solo passivo. In ogni caso il brano citato appare vicino al clima culturale della rivoluzione scientifica. Quella avanzata è infatti un'"ipotesi" che permette di "salvare i

[57] Cfr. Teofrasto, *Metaphysica*, 10a, 22-11b, 26.
[58] Aristotele, *Physica*, II, 8, 198b, 16-31.
[59] La soluzione di Aristotele della "difficoltà" (l. c., linee 32 sgg.) si basa sull'osservazione che i fenomeni descritti (la forma degli incisivi, quella dei molari, ecc.) si verificano in modo regolare e non sporadico, come accade per gli avvenimenti casuali. L'argomento mi sembra oscuro, in quanto l'apparizione regolare di organi adatti alle funzioni può essere spiegata proprio con il meccanismo di selezione naturale appena esposto. Il brano diverrebbe molto più chiaro se la soluzione di Aristotele della difficoltà seguisse direttamente le osservazioni sulla forma dei denti, se cioè l'ultimo capoverso del passo che abbiamo riportato, contenente l'idea della selezione naturale, fosse stato interpolato, per illustrare meglio la "difficoltà", da qualcuno non convinto della soluzione di Aristotele.

fenomeni", proprio nello spirito di Aristarco; si tratta, in ambedue i casi, di basarsi coraggiosamente su un'assunzione apparentemente lontana dalla fenomenologia osservata e, traendone tutte le conseguenze, verificare che essa riesce in realtà a spiegare una fenomenologia più vasta.

Il primo studioso che ha riconosciuto l'eccezionale importanza del passo aristotelico non è stato uno specialista in storia della scienza ma uno scienziato.[60]

Strabone (che sull'argomento riporta anche frammenti di Posidonio[61]) fa risalire a Eratostene lo studio delle trasformazioni della crosta terrestre e riferisce che secondo Eratostene la prova di spostamenti, in tempi geologici, delle linee costiere era fornita della presenza di depositi di organismi marini fossili.[62] Dobbiamo dedurne che tali organismi avevano fornito materia di riflessione agli scienziati ellenistici. Abbiamo visto, d'altra parte, che le basi del moderno evoluzionismo, il concetto di mutazione e quello di selezione naturale, erano ambedue presenti nella cultura ellenistica.[63] Tali concetti avevano portato a compiute teorie evoluzioniste? La perdita quasi totale delle opere zoologiche e botaniche non permette una risposta certa. Va notato però che idee generali sull'evoluzione della natura precedono quelle della selezione naturale e delle mutazioni, essendo ripetutamente accennate (e criticate) da Aristotele, che le attribuisce una volta a Speusippo e ad "alcuni Pitagorici" e altrove, più genericamente, a pensatori suoi contemporanei.[64] Una spiegazione razionalista dell'evoluzione animale sembra inoltre già presente in Anassagora, quando osserva che l'uomo deve la propria intelligenza alle mani, rese disponibili alla manipolazione dalla stazione eretta.[65] Versioni prescientifiche dell'evoluzione biologica erano state esposte da vari pensatori presocratici, da Anassimandro[66] a Empedocle, che, in particolare,

[60] Charles Darwin, *The origin of species by means of natural selection*, London, 1861[3]. La citazione del passo aristotelico e l'osservazione che il principio della selezione naturale vi è adombrato (*shadowed*) sono all'inizio dell'opera.

[61] Strabone, *Geografia*, II, iii, 6.

[62] Strabone, *Geografia*, I, iii, 4.

[63] Riguardo ai meccanismi della selezione, l'importante osservazione che nella lotta per la sopravvivenza una specie non deve battersi con i propri predatori, ma con i concorrenti (cioè con gli animali che si nutrono dello stesso cibo) è riferita da Plutarco, che riporta anche un'interessante analogia con la concorrenza economica (*De fraterno amore*, 486B).

[64] Aristotele, *Metaphysica*, XII, 1072b, 30-1073a, 3; XIV, 1091a 31-36; 1092a, 11-17. Cfr. anche [Popper OSE], vol. 2, p. 285 (n. 11 al cap. 11).

[65] L'importante osservazione di Anassagora è riferita (e confutata con argomenti teleologici) da Aristotele (*De partibus animalium*, IV, 687a, 8-10).

[66] Anassimandro aveva sostenuto, in particolare, che la vita fosse nata nell'acqua, come sappiamo da Aezio ([DG], 430).

aveva immaginato che sulla terra fossero vissuti esseri mostruosi, ottenuti ricombinando a caso singole membra animali.[67] Lucrezio sembra riferire critiche scientifiche alla concezione di Empedocle quando scrive:

Che vi fossero infatti nel suolo molti germi fecondi,
al tempo in cui la terra per la prima volta produsse animali,
non è un segno che potessero generarsi bestie
e membra animali mescolate e congiunte fra loro,
perché quelle specie, delle quali anche oggi abbonda la terra,
di erbe e messi e piante rigogliose
non possono generarsi unite tra loro,
ma ognuna procede a suo modo e tutte
per legge di natura conservano i propri caratteri distintivi.[68]

Il concetto di specie basato sull'interfecondità, spesso considerato "moderno", doveva essere chiaro nelle fonti di Lucrezio, che lo riferisce in modo ragionevole. Lucrezio, inoltre, non solo riprende, quasi esattamente negli stessi termini, le idee del passo aristotelico sulla selezione naturale,[69] ma scrive anche:

Il tempo, infatti, muta la natura di tutto il mondo
ed ogni cosa deve passare da uno stato ad un altro
e non vi è nulla che rimanga simile a se stesso: tutto cambia,
la natura altera ogni cosa e la costringe a trasformarsi.
Ed infatti l'una marcisce e si indebolisce col tempo,
e l'altra, prima trascurabile, prende il suo posto. [...]
E bisogna che molte razze di animali si siano estinte
e non abbiano potuto generare prole propagandosi.
Infatti quelle che vedi godere dell'aria vitale,
o l'astuzia o la forza o la velocità
le ha conservate proteggendole sin dall'inizio dei tempi.[70]

La concezione di Lucrezio è certamente molto ingenua: egli dapprima sembra credere alla generazione spontanea; parla però di *specie* estinte (e non di individui); afferma poi che le *razze* (*saecla*) non estintesi sono state salvate dalle proprie capacità di adattamento. Non si tratta evidentemente di animali nati per generazione spontanea.[71] Che nelle fonti di Lucrezio la selezione

[67] Empedocle, *Poema fisico*, framm. 6,7 (Gallavotti) = framm. 35, 57, 58, 59, 61, 60 [Diels]. Il concetto di casualità, in particolare, sembra chiaramente espresso nel verso ταῦτα δὲ συμπίπτεσκον ὅπῃ συνέκυρσεν ἕκαστα (framm. 59 [Diels]).

[68] Lucrezio, *De rerum natura*, V, 916-924.

[69] Lucrezio, *De rerum natura*, IV, 823-842.

[70] Lucrezio, *De rerum natura*, V, 828-833, 855-859. Nei vv. 834-854, che ho tralasciato, Lucrezio parla di esseri mostruosi vissuti nel lontano passato.

[71] L'idea che gli animali non possano generarsi spontaneamente, ma debbano nascere necessariamente da altri animali è in genere considerata moder-

naturale operasse alterando gradualmente le caratteristiche specifiche è suggerito dall'accenno di Lucrezio a uomini primitivi, con diversa struttura ossea e privi di linguaggio.[72]

Come vedremo, nel primo periodo ellenistico vi fu per la prima volta un intervento diretto degli studiosi nelle tecniche agricole.[73] Gli studi sulle piante, oltre che per l'agricoltura, erano importanti per la farmacologia, che divenne la principale applicazione della botanica in età imperiale. La migliore fonte su questo argomento è il *De materia medica*, compilato nel I secolo d.C. dal medico Dioscoride e rimasto fino all'età moderna il migliore trattato conservato sulle proprietà medicinali delle piante.

5.7. *La chimica*

In epoca ellenistica iniziarono gli studi di chimica. Questi studi vengono in genere classificati come "alchimia", ma la prima documentazione esistente riguardante ciò che tradizionalmente si designa con il nome di alchimia, e cioè un sincretismo di filosofia naturale greca, magia egizia, riferimenti alle religioni ebraica e cristiana, procedimenti artigianali e chimica empirica, è costituita dagli scritti di Zosimo di Panopoli, dell'inizio del IV secolo d.C.[74]: un'epoca in cui in tutti i campi la scienza ellenistica è stata ormai sopraffatta dalle tradizioni indigene.

Purtroppo quasi nulla è rimasto delle opere precedenti su questo argomento e uno dei motivi è suggerito dallo stesso Zosimo, che insiste più volte sul carattere segreto delle conoscenze da lui trasmesse.[75] Sia Zosimo che gli "alchimisti" successivi non solo qualificano spesso la propria come *arte sacra* (ἱερὰ

na e fatta risalire a Francesco Redi, del XVII secolo. La stessa convinzione è però attribuita da Alessandro Poliistore alla scuola pitagorica (cfr. Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VIII, 28). Redi, che dedica le prime pagine delle sue *Esperienze sulla generazione degl'insetti* a una disamina delle opinioni degli Antichi sull'argomento, non accenna al passo di Alessandro Poliistore riportato da Diogene Laerzio, ma preferisce citare Diogene Laerzio quando riporta l'opinione opposta: quella che un tempo persino gli uomini fossero nati per generazione spontanea; cfr. F. Redi, *Esperienze sulla generazione degl'insetti*, p. 584 (in [Scienziati del Seicento]).

[72] Lucrezio, *De rerum natura*, V, 925-928, 1028-1032.

[73] Cfr. più avanti, pp. 187-188.

[74] Recentemente è stata pubblicata un'edizione critica delle *Memorie autentiche* di Zosimo, di cui ci sono rimasti 13 frammenti ([Zosimo]). Per gli altri scritti bisogna usare l'edizione di Berthelot e Ruelle del 1888, che è però insoddisfacente da vari punti di vista.

[75] Cfr. Zosimo, *Memorie autentiche* (ed. Mertens) IV, 1, 30-34; VII, 2, 8-10; X, 7, 135-137.

τέχνη) ma fanno anche esplicito riferimento ad antichi centri religiosi egizi (soprattutto Menfi) come al luogo d'origine delle conoscenze chimiche. Si può pensare che fin dalle origini la chimica fosse stata sottoposta in Egitto al controllo della classe sacerdotale,[76] che anche in epoca tolemaica controllava varie attività economiche esercitate nei templi.[77] I tentativi di ricostruzione della chimica empirica ellenistica sono resi particolarmente difficili dal suo confluire nell'alchimia dei secoli successivi, cosicché dobbiamo cercare di intravedere le sue caratteristiche attraverso il filtro degli alchimisti, che hanno deciso quali conoscenze tramandarci e come mescolarle con ingredienti esoterici. L'esistenza di una chimica empirica ellenistica è comunque provata dai fatti seguenti:

- In epoca ellenistica, come vedremo, vi è un drastico miglioramento delle tecniche di estrazione e di raffinamento dei metalli e si sviluppano varie industrie che comportano trasformazioni della materia.[78]
- Plinio distingue esplicitamente tra coloranti naturali e artificiali[79] e contrappone i pittori dell'età classica, che usavano solo quattro colori, ai pittori di epoca ellenistica, che usavano una gran quantità di colori diversi.[80]
- Alcuni procedimenti per preparare coloranti artificiali sono esposti da Vitruvio e alcuni di essi sono attribuiti agli Alessandrini.[81]
- In epoca ellenistica nasce il termine ancora usato per *chimica*: χημεία (o χυμεία).[82]
- Molti apparecchi chimici, in particolare per la distillazione e la sublimazione, sono descritti da Zosimo e da altri alchimisti. Alcuni sono attribuiti a Maria Giudea, sorella di Mosè,[83] ma i

[76] Sul rapporto tra le antiche conoscenze "alchimistiche", la classe sacerdotale egizia e in particolare il santuario di Menfi, cfr. M. Mertens in [Zosimo], nota complem. 9, pp. 187-189 (dove sono anche vari riferimenti bibliografici sull'argomento).

[77] Cfr. avanti, p. 181.

[78] Cfr. più avanti, pp. 190-193.

[79] Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 30.

[80] Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 49-50.

[81] Vitruvio, *De architectura*, VII, xi-xiv.

[82] Gli Arabi, aggiungendovi l'articolo, trasformarono la parola in *alchimia*. I moderni vollero usare una terminologia che nobilitasse la propria scienza delle trasformazioni della materia e minimizzasse le antiche conoscenze greche; è significativo, però, che a questo scopo non trovarono di meglio che usare il termine greco per la scienza propria e il termine arabo per la scienza greca; il termine χημεία fu infatti usato sostanzialmente inalterato per la scienza moderna, ma tradotto sprezzantemente con *alchimia* se riferito all'Antichità.

[83] Si tratta in realtà di una donna vissuta ad Alessandria, probabilmente nel I secolo d.C., che scrisse sotto lo pseudonimo di *Miriam la Profetessa, sorella di Mosè*.

loro nomi sono tutti greci.[84] Nelle opere alchimistiche si trovano sempre questi tre elementi: termini tecnici greci, elementi di magia egiziana e riferimenti alla religione ebraica. Questa mescolanza greco-ebraico-egizia indica abbastanza chiaramente il luogo di irradiazione delle conoscenze alchimistiche nella città trilingue di Alessandria.

• Nell'opera di Zosimo, accanto agli elementi religiosi e al simbolismo allegorico che sempre più caratterizzeranno le opere successive, sono contenute informazioni su una varietà di composti e reazioni chimiche; su questi argomenti dovevano evidentemente essersi accumulate conoscenze nei secoli precedenti.

• Nell'opera "alchimistica" più antica di cui abbiamo notizia, il trattato *Physica et Mystica* attribuito a Bolo Democrito di Mende (città del Delta), databile probabilmente all'inizio della nostra era, non vi è nulla dell'alchimia successiva. Dalla piccola parte che ne è rimasta e dalle molte citazioni si può dedurre che quest'opera, dedicata alla preparazione di imitazioni dell'oro, dell'argento, delle gemme e della porpora, descrivesse i procedimenti tradizionali usati da diversi artigiani (quali tintori, vetrai e metallurgici), analizzandone possibili modifiche.

• Anche il papiro di Leyda e quello di Stoccolma,[85] risalenti probabilmente alla fine del III o all'inizio del IV secolo d.C. e classificati anch'essi in genere tra le opere "alchimistiche", mancano totalmente di riferimenti magici. Si tratta semplicemente di elenchi di ricette per la preparazione di varie sostanze. I soggetti preferiti, come nel trattato di Bolo (del quale probabilmente questi papiri contengono estratti) sono le imitazioni di gemme e metalli preziosi. La caratteristica che più sembra interessare gli autori di queste opere è il colore della sostanza prodotta; questa attenzione per il colore suggerisce che la principale applicazione della chimica alessandrina fosse stata l'industria dei coloranti.

• Già a Crisippo, nel III secolo a.C., era chiara la triplice distinzione tra materiali eterogenei, miscele omogenee e composti chimici, come sappiamo da Alessandro di Afrodisia.[86]

• Nei papiri di Leyda e di Stoccolma quando le quantità degli ingredienti (che spesso non sono menzionate) sono indicate, il più delle volte lo sono in *parti*. L'uso occasionale di misure di peso fa capire che le *parti* si intendono misurate con una bilan-

[84] Cfr. [Holmyard AA], pp. 743 sgg.; M. Mertens, *Introduction technique*, in [Zosimo].

[85] P. Leyd. X, P. Holmiensis. Una edizione recente di tali papiri è [papiri alchimistici].

[86] Alessandro di Afrodisia, *De mixtione*, 216,14-218,6.

cia. Questo uso delle bilance doveva aver portato a quel principio di conservazione della massa che, attribuito a Lavoisier, è considerato una delle maggiori conquiste della chimica del secolo XVIII. Infatti, anche se non ci sono rimasti trattati scientifici che trattano questo argomento, ad esso si trovano diversi riferimenti in opere letterarie. Nel *De rerum natura* il principio di conservazione della massa non solo è chiaramente enunciato[87] (anche se, naturalmente, nella forma poetica che ha reso possibile la conservazione dell'opera), ma viene anche spiegato con l'indistruttibilità degli atomi e con l'attribuire le densità delle varie sostanze alla diversa specie e quantità degli atomi contenuti in volumi eguali. Un'altra testimonianza è fornita da Luciano che, nella *Vita di Demonatte*, ricorda che quando qualcuno chiese a Demonatte "quante mine di fumo si ottengono bruciando 1000 mine di legna?" ne ebbe la risposta: "pesa la cenere; quanto resta è fumo". Ovviamente è poco rilevante che il metodo proposto da Demonatte non sia per noi corretto (per le reazioni chimiche cui partecipa l'ossigeno atmosferico). Più ancora della risposta è interessante la domanda. Come può venire in mente di chiedere il peso di una quantità di fumo? Mi sembra che l'unico senso che si può dare a una richiesta del genere sia il tentativo di ridicolizzare una teoria scientifica esistente, che attribuiva una "massa" a tutti gli oggetti. È chiaro che le fonti di Lucrezio e di Luciano dovessero contenere a proposito di questo argomento più di quanto possiamo leggere in opere letterarie; in genere si è sostenuto invece che un principio di conservazione della massa mancasse nell'antichità.[88] Un importante antecedente (prescientifico) del principio di conservazione della massa era già nell'enunciazione della conservazione della materia da parte di Empedocle.[89]

• Alcune altre conoscenze dell'antica chimica empirica filtrano dai papiri ritrovati. Particolarmente interessante è l'uso della parola ὄξος. Tale parola viene in genere tradotta con *aceto*, che ne è il significato originario. Nella 14ª ricetta del papiro di Leyda si parla però di ὄξος ἀπὸ καθάρσεως χρυσίου, cioè di ὄξος *proveniente dalla purificazione dell'oro*. Poiché i metodi descritti per la purificazione dell'oro potevano produrre acido cloridrico o solforico e certamente non aceto di vino, evidentemente ὄξος è

[87] Lucrezio, *De rerum natura*, II, 294-296.

[88] È questa, ad esempio, l'opinione di Max Jammer, che, dopo aver citato la risposta di Demonatte, scrive che "questa e altre analoghe affermazioni rimasero però isolate [...] né queste teorie sono all'origine della formazione del concetto di 'quantità di materia' in senso tecnico" ([Jammer CM], p. 35).

[89] Empedocle, *Poema fisico*, fr. 4 (Gallavotti) = fr. 17, 14, 13, 17, 22, 20 [Diels].

usato in un senso simile a quello di "acido", concetto che doveva essere in parte chiaro ai chimici empirici alessandrini. Secondo Livio, Annibale avrebbe usato dell'*aceto* per distruggere un masso che ostruiva il passaggio di una gola.[90] L'attendibilità del racconto di Livio è dubbia, soprattutto perché in Polibio non vi è alcun riferimento all'episodio. È però in ogni caso interessante che Livio abbia saputo di una tale possibilità. Si può sospettare che, come quello del papiro di Leyda, anche l'ὄξος usato da Annibale (o, in ogni caso, quello di cui aveva sentito parlare Livio) fosse in realtà molto più forte di quello ottenibile dal vino.[91]

• Il moderno concetto di molecola ha un interessante precedente in quello ellenistico di ὄγκος.[92] L'ὄγκος è infatti concepito come componente ultimo delle diverse sostanze, ma, a differenza degli atomi (di cui sembra essere costituito), è suscettibile di mutamenti, dovuti alla riorganizzazione delle sue parti, che rendono conto dei cambiamenti qualitativi delle sostanze.[93]

Possiamo concludere che in epoca ellenistica nacque la chimica come "scienza empirica", anche se non è possibile determinare il livello delle conoscenze che furono elaborate. L'alchimia si formò solo in età imperiale, attingendo dalla antica chimica empirica strumentazione e parte dei procedimenti e cercando altrove fini e quadro concettuale di riferimento. In modo analogo dalla decadenza dell'astronomia ellenistica si era generata l'astrologia.

[90] Tito Livio, *Ab urbe condita libri*, XXI, xxxvii, 2.

[91] Questa possibilità è suggerita anche da R. Halleux ([papiri alchimistici], p. 31).

[92] Sesto Empirico (*Adversus Dogmaticos*, IV, 318) attribuisce l'uso di questo concetto ad Asclepiade (I secolo a.C.) e, prima di lui, già ad Eraclide Pontico (IV secolo a.C.).

[93] Cfr. Sesto Empirico, *Adv. Dogm.*, IV, 43-44. Il significato originario del termine ὄγκος è quello di *volume, massa, mole*. Sarebbe interessante indagare in dettaglio sul contributo del ricordo dell'antico concetto di ὄγκος alla formazione del moderno concetto di molecola. Facciamo a questo proposito due sole osservazioni. La prima è che il termine ὄγκος in contesti scientifici fu sistematicamente reso in latino con *moles* (perfino quando il termine ha il significato di volume, come appare dalle traduzioni latine di Guglielmo di Moerbeke, di I. Barrow e di J. Torelli del trattato *Sui galleggianti* di Archimede). La seconda osservazione è che il brano in cui Robert Boyle introduce l'idea moderna (R. Boyle, *The sceptical Chymist*, London, 1661, cap.1, prop.2) sembra reminiscente dei passi di Sesto Empirico, che è del resto la nostra fonte quasi unica sull'antico scetticismo cui Boyle esplicitamente fa riferimento nella sua opera.

6. Economia e tecniche produttive

6.1. *La politica economica e culturale dei sovrani ellenistici*

L'organizzazione economica e giuridica degli stati ellenistici è solo parzialmente conosciuta. Nel caso dell'Egitto tolemaico, in cui sono disponibili più informazioni, è certo che vi fossero allo stesso tempo un forte settore statale e notevoli margini per l'iniziativa privata. Inoltre antiche istituzioni risalenti all'epoca faraonica furono conservate e integrate nel nuovo sistema.

La struttura allo stesso tempo composita e organica dello stato egiziano è bene illustrata dallo stato giuridico dei terreni agricoli. Molte terre erano "terre regie", coltivate cioè per conto del re. Altre terre erano "terre sacre", cioè il loro sfruttamento era controllato dalla classe sacerdotale e permetteva il mantenimento della rete dei templi. A queste due situazioni giuridiche, ereditate dall'Egitto faraonico, si aggiungono altre due possibilità: la proprietà privata della terra, risalente forse alla dominazione persiana, e infine, novità quest'ultima certamente introdotta dai Tolomei, i terreni concessi a funzionari come "donazioni revocabili".

La politica agricola dei sovrani ha come principale obiettivo l'aumento della produzione, che nel caso dei terreni "regi" viene attuato con un rigido controllo statale sui metodi di coltivazione. Grandi sforzi sono compiuti per estendere i terreni coltivati e i terreni nuovi vengono usati anche per incrementare la proprietà terriera privata. [1]

Una fonte importante sull'Egitto ellenistico è costituita dall'archivio di Zenone, amministratore di Apollonio, dieceta [2] di

[1] Tra i lavori classici sulla politica economica dei Tolomei, oltre ai fondamentali contributi di Rostovzev, ricordiamo solo [Préaux ERL].

[2] Vale a dire direttore degli affari finanziari ed economici del sovrano.

Tolomeo II Filadelfo.[3] Una lettera dell'archivio, in cui Apollonio informa il proprio amministratore di aver ricevuto dal re l'ordine di introdurre nella propria donazione il doppio raccolto annuo, illustra la cura con cui il re seguiva i progressi dell'agricoltura.[4]

Le produzioni dell'olio vegetale, dei tessuti di lino, del sale e della birra erano monopoli regi. Lo stato possedeva un registro di tutti i telai tenuti a casa dai tessitori a domicilio[5] e nei periodi in cui la produzione veniva sospesa si ponevano sigilli su telai e frantoi per impedirne un uso illegale.[6] Anche la produzione della carta, pur non essendo un monopolio, avveniva in parte considerevole in opifici regi.

Il forte settore statale dell'economia coesisteva con un'iniziativa privata vivace. Sappiamo della presenza ad Alessandria, sin dall'inizio dell'epoca tolemaica, sia di mercanti stranieri che di persone agiate attratte in Egitto dalle occasioni di investimento. Una lettera del 258 a.C., appartenente all'archivio di Zenone, è a questo proposito particolarmente interessante. L'autore della lettera, un certo Demetrio, forse un funzionario della zecca, riferendo una difficoltà (non chiara), scrive al dieceta Apollonio:

> Gli stranieri che giungono qui per mare, mercanti, spedizionieri e altri, portano con sé buona moneta del loro paese [...] Queste persone sono furiose perché rifiutiamo di rifornire di moneta le banche [...] e loro non possono inviare loro agenti nel paese per acquistare merce; dicono che il loro oro resta inoperoso e che stanno soffrendo gravi perdite.[7]

Queste persone furiose perché *il loro oro resta inoperoso* ricordano i capitalisti dell'età moderna. Non si trattava però solo di capitalismo mercantile, come questo brano potrebbe suggerire. Manifatture di proprietà privata, con operai salariati, sono infatti attestate in Egitto in molti casi fino all'età romana. Siamo anche informati su contrattazioni sul salario tra datori di lavoro e operai.[8]

[3] L'archivio di Zenone fornisce in particolare molte informazioni sulla donazione concessa ad Apollonio dal Filadelfo; tali informazioni furono esaminate per la prima volta in [Rostovzev LEE].

[4] P. Cairo Zen. 59155.

[5] Cfr. [Rostovzev ET], p. 548.

[6] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. I, p. 316 (per i frantoi) e p. 329 (per i telai).

[7] P. Cairo Zen. 59021. Il brano trascritto è discusso in [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 421-423.

[8] Interessanti contratti di assunzione di apprendisti salariati, risalenti alla prima età imperiale, sono, ad esempio, in P. Oxy. 275 e in P. Oxy. 725. Per gli "scioperi" in epoca tolemaica dei dipendenti pubblici cfr. [Rostovzev SESME],

Si può quindi parlare, come si è fatto, di borghesia e di capitalismo, purché non si dimentichi che gli elementi che permettono l'uso di questi termini convivono sia con un forte dirigismo statale che con strutture di origine faraonica. Nell'Egitto faraonico una parte importante dell'economia era gestita dai templi. Un "tempio" egiziano era molto diverso da ciò che intendiamo usualmente con questo termine. Al suo interno non vi erano solo stanze riservate al culto o a uso dei sacerdoti, ma anche opifici di vario genere (in cui si producevano, tra l'altro, tessuti, olio e birra) e piccole biblioteche; alcuni templi fungevano anche da luogo di cura. I templi erano cioè il luogo in cui, con il controllo dei sacerdoti, erano concentrate tutte le conoscenze, non solo religiose ma anche tecnologiche e mediche. I Tolomei rispettarono le antiche prerogative dei templi. Quando fu istituito il monopolio dell'olio i templi furono autorizzati a conservare i frantoi, anche se solo per produrre olio per uso proprio.[9]

La gestione del settore economico statale richiese una burocrazia complessa ed efficiente, solo in parte ereditata dall'Egitto faraonico. Rostovzev scrive:

> L'avere ricostruito e trasformato secondo un disegno generale e con un intento ben definito il sistema burocratico orientale deve considerarsi una delle opere più stupefacenti del genio greco, e prova della sua flessibilità e adattabilità.[10]

La corrispondenza tra struttura e funzione, che negli antichi imperi era stato per lo più il risultato di un lento processo di selezione naturale, diviene ora l'effetto di scelte consapevoli, che permettono la creazione in tempi brevi di una serie di strutture nuove.

Nell'Egitto tolemaico troviamo per la prima volta una banca centrale di stato, che si occupa sia di amministrare le finanze che di investire le risorse pubbliche, anche con prestiti ai clienti privati.[11] I depositi bancari sono molto diffusi, anche tra artigiani e commercianti al minuto. Tra le operazioni bancarie appaiono, per la prima volta, scritture contabili che trasferiscono somme da un deposito all'altro: nasce cioè il bonifico bancario. Rostovzev, che cita diversi pagamenti di questo tipo effettuati, nel II secolo a.C., in una piccola succursale bancaria

vol. II, p. 329. Per le contrattazioni sul salario in età imperiale (documentate, ad esempio, in P. Oxy. 1668) cfr., ad esempio, [Bowman], p. 126.

[9] Siamo bene informati sul monopolio dell'olio perché la legge relativa è stata ritrovata integra (P. Rev. Laws, 38-56).

[10] [Rostovzev SESME], vol. III, pp. 163-164.

[11] [Rostovzev SESME], vol. III, pp. 375-380.

della quale sono stati trovati alcuni conti in un papiro, [12] osserva:

> Vari eminenti studiosi pensano essere improbabile che siffatti trasferimenti si effettuassero nell'antichità. [13]

Gli eminenti studiosi cui Rostovzev allude, convinti che nell'"antichità" non si sapesse calcolare sostituendo a oggetti concreti quantità simboliche, probabilmente non avevano mai studiato la matematica ellenistica.

Sembra che nell'Egitto dei Tolomei vi sia stato anche un sistema pubblico di assistenza sanitaria. [14] Alcune delle nuove strutture derivano da istituzioni più antiche parzialmente analoghe. È questo probabilmente il caso del servizio sanitario pubblico, che continua un'istituzione egizia di epoca faraonica, [15] e del servizio postale tolemaico, che ha certamente un importante antecedente persiano. L'idea moderna di servizio pubblico, strettamente connessa al nostro concetto di Stato, sembra nascere negli stati ellenistici; è un'idea nuova, che nasce da due precedenti: il concetto di "cittadino" ereditato dalle πόλεις greche e la complessa struttura organizzativa degli antichi imperi.

Tra le nuove strutture statali hanno particolare importanza quelle con la funzione di promuovere la scienza e la cultura. Innanzitutto i Tolomei creano ad Alessandria il Museo, cioè il primo istituto pubblico di ricerca di cui si abbia notizia. [16] Sappiamo da Strabone che i pasti venivano serviti in una sala comune. [17] La vita collettiva certamente favoriva gli scambi culturali: se si tiene presente che Erofilo potrebbe essere stato un abituale commensale di Euclide e di Ctesibio, diviene certo più facile rendersi conto delle possibili influenze reciproche.

Nel Museo, a disposizione dei suoi ospiti, vi è la famosa Biblioteca. [18] Tolomeo II Filadelfo non solo acquista libri su tutti i mercati e li richiede agli stati con cui ha rapporti, ma instaura

[12] P. Teb. 890.

[13] [Rostovzev SESME], vol. III, p. 377.

[14] Un'iscrizione di Delo ([OGIS], 104) è in onore di un nobile alessandrino che vi è indicato sia come *capo dei medici* di Alessandria che come *presidente del Museo*. Ciò fa pensare ad una connessione tra il Museo ed il servizio sanitario pubblico. Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, pp. 179-181.

[15] Cfr. [von Staden], p. 23.

[16] L'Accademia e il Liceo di Atene, che per molti altri aspetti anticipano il Museo di Alessandria, erano infatti istituzioni private.

[17] Strabone, *Geografia*, XVII, i, 8. Non abbiamo descrizioni del Museo risalenti al III o al II secolo a.C. Sembra comunque certo che il particolare riferito da Strabone risalisse al primo periodo tolemaico, anche perché già nel Liceo vi era la stessa usanza.

[18] La Biblioteca era contenuta nel Museo e non in un edificio separato. Cfr., ad esempio, [Canfora].

anche una tassa significativa: le navi che fanno scalo ad Alessandria debbono denunciare tutti i libri che hanno a bordo e darli alla Biblioteca; in cambio ne riceveranno una copia. Allo stesso tempo si organizza la redazione di molti libri nuovi, soprattutto traduzioni di opere straniere. Dopo qualche decennio di questa politica la Biblioteca contiene circa mezzo milione di libri.

Tra le strutture scientifiche a disposizione degli studiosi del Museo vi era lo zoo istituito da Tolomeo II Filadelfo. Altre istituzioni culturali si rivolgevano a tutta la popolazione, come il Serapeo, che fu la prima biblioteca pubblica; si trattava di una sezione staccata della grande Biblioteca di Alessandria, che all'epoca di Callimaco, nel III secolo a.C., conteneva 42.800 libri.

Uno stato ellenistico sul quale le poche notizie che abbiamo bastano a mostrarci dei sovrani interessati, come i Tolomei, ad una "politica della scienza" è il piccolo stato di Pergamo. Gli Attalidi vi organizzarono una biblioteca che era seconda solo a quella di Alessandria. I sovrani erano direttamente impegnati negli studi di botanica e di agronomia: Attalo III scrisse un trattato di agricoltura e sia lui che gli altri sovrani della dinastia promossero studi sperimentali di botanica, ai quali si dedicarono anche personalmente, usando i giardini reali.

Gli Attalidi furono anche interessati a sviluppare l'ingegneria e in particolare la tecnologia militare. L'opera di Bitone su questo argomento fu dedicata ad Attalo I e forse anche l'Ateneo autore di opere sulle macchine d'assedio ebbe rapporti con gli Attalidi.[19] Gli scavi sulla cittadella di Pergamo hanno dimostrato come questi interessi per l'ingegneria non fossero solo teorici. Abbiamo già accennato all'acquedotto;[20] gli archeologi autori degli scavi hanno sottolineato come anche le fortificazioni fossero costruite in stretta aderenza ai trattati dell'epoca.

Le poche notizie che abbiamo sugli altri stati ellenistici non sono sufficienti per delineare un quadro completo delle eventuali iniziative assunte nei vari stati allo scopo di promuovere la scienza e la tecnologia. È possibile solo citare fatti isolati. Per quanto riguarda lo stato dei Seleucidi, abbiamo già accennato sia allo sviluppo della matematica e dell'astronomia matematica che al salto di qualità realizzato già all'inizio del III secolo nella tecnologia navale; sappiamo, d'altra parte, che la struttura urbana di Antiochia era per molti versi simile a quella di Alessandria e che la nuova città di Seleucia sul Tigri era divenuta anch'essa rapidamente una metropoli internazionale; abbiamo visto che al sorgere ad Alessandria della scuola medica di

[19] Cfr., ad es., [Rostovzev Pergamo], p. 697.
[20] Cfr. sopra, p. 130.

Erofilo corrispose la contemporanea attività scientifica di Erasistrato, probabilmente ad Antiochia. Sappiamo di biblioteche in altri stati, come in Macedonia, e il primo mulino idraulico di cui abbiamo notizia fu costruito a Cabeira per volontà del re del Ponto, che possedeva anche un giardino zoologico.[21] Strabone parla anche di osservatori astronomici in Caria ed in Libia[22] e abbiamo visto il sovrano di Siracusa Gerone II usare la scienza di Archimede per la tecnologia navale e militare.

Questi esempi suggeriscono che l'attenzione verso la cultura e la scienza dei sovrani dell'Egitto e di Pergamo fosse in realtà diffusa, in misura maggiore o minore, in tutto il mondo ellenistico.

La politica culturale assorbiva notevoli risorse economiche. Per molti dei libri redatti per la Biblioteca di Alessandria fu organizzata la traduzione in greco di testi stranieri chiamando dai paesi di origine gruppi di esperti bilingui[23]; il finanziamento di queste edizioni, per il loro numero elevatissimo, dovette essere una spesa rilevante anche per la ricchissima dinastia dei Tolomei. La natura dell'interesse dei sovrani ellenistici per la cultura è bene illustrata dalla "guerra della carta" tra i Tolomei e il regno di Pergamo. Tolomeo II Filadelfo, per bloccare lo sviluppo della biblioteca rivale di Pergamo, interruppe l'esportazione di papiro dall'Egitto.[24] Questa decisione, più che dovuta alla gelosia di un bibliofilo per un rivale, appare il tentativo di riservare al proprio stato un prodotto considerato di importanza strategica.

L'interesse dei sovrani ellenistici per la cultura non era dovuto a liberalità, ma all'avere individuato nella conoscenza una sorgente essenziale di potere. Nulla di paragonabile si verificò più fino alle monarchie illuminate dell'Europa del '700.

Le iniziative culturali finanziate dallo stato, e in particolare le redazioni di libri, avevano spesso fini politici. Ad esempio la traduzione in greco della Bibbia tradizionalmente nota come *Versione dei Settanta* fu allo stesso tempo uno strumento e un effetto della politica dei Tolomei di assimilazione della importante comunità ebraica di Alessandria. Nella prima metà del III secolo a.C. il sacerdote egiziano Manetone redasse le *Storie Egizie* e il sacerdote babilonese Berosso scrisse una *Storia babilonese* dedicata ad Antioco I Sotèr. Si trattava di lavori scritti in greco, finalizzati a una migliore comprensione delle culture indigene. I

[21] Cfr. Strabone, *Geografia*, XII, iii, 30.

[22] Strabone, *Geografia*, XVII, i, 30.

[23] Solo per il corpus attribuito a Zoroastro si trattò, secondo Plinio (*Naturalis historia*, XXX, 4), di organizzare e coordinare la traduzione in greco di due milioni di versi.

[24] Come è ben noto, la risposta del regno di Pergamo non fu la rinunzia ai libri, ma il perfezionamento di quel materiale di scrittura che da allora prese il nome di pergamena.

sovrani ellenistici avevano capito che la conoscenza delle culture dei popoli dominati poteva essere essenziale per esercitare il dominio.

L'interesse per la scienza aveva però anche e soprattutto motivazioni economiche che sono più chiare nel caso degli Attalidi. La minore disponibilità di risorse del piccolo stato di Pergamo li spingeva infatti a finanziare ricerche con una ricaduta applicativa immediata, come quelle dirette allo sviluppo dell'agricoltura e dell'ingegneria. Che l'interesse degli Attalidi per l'agricoltura non fosse un "hobby", ma fosse volto ad uno sviluppo sistematico delle conoscenze allo scopo di migliorare lo sfruttamento agricolo del regno è indicato dal fatto che la maggioranza degli autori di trattati sull'agricoltura elencati da Varrone[25] sono legati in un modo o nell'altro a Pergamo.[26] L'interesse degli Attalidi per la scienza e la tecnologia ebbe forse delle conseguenze anche sull'attività manifatturiera. Pergamo divenne, in particolare, un esportatore di prodotti tessili e vi si iniziò la tintura delle stoffe con coloranti di origine minerale.[27]

Nel caso dei Tolomei la ricchezza dell'Egitto rese conveniente finanziare anche quella che oggi chiameremmo "ricerca di base", come risulterà dall'esame di alcuni dei miglioramenti nelle tecniche produttive resi possibili dalla nuova tecnologia scientifica.

6.2. *La tecnologia produttiva*

Rostovzev ha scritto:

> Possiamo accettare l'opinione di parecchi studiosi moderni, secondo i quali il brillante sviluppo delle scienze esatte verificatosi nel periodo ellenistico contribuì largamente al miglioramento dei metodi di produzione e di scambio, mediante l'invenzione di nuovi procedimenti tecnici.[28]

In questo paragrafo cercheremo di illustrare l'opinione accettata da Rostovzev (ma rimasta minoritaria) descrivendo al-

[25] Varrone, *De re rustica*, i, 1, 8 sgg.
[26] Cfr. [Rostovzev Pergamo], p. 694.
[27] Cfr. avanti, p. 193.
[28] [Rostovzev SESME], vol. III, p. 270. Purtroppo il rapporto scienza esatta-tecnologia-economia in epoca ellenistica è solo enunciato da Rostovzev, giacché nella sua opera, che traccia un quadro ricco e affascinante della civiltà ellenistica nei suoi aspetti economici, sociali, politici e anche, in parte, culturali e tecnologici, manca quasi completamente l'altro termine del rapporto: le scienze esatte, alle quali questo passo costituisce una delle rare allusioni.

cuni progressi delle tecnologie produttive resi possibili dalla rivoluzione scientifica. Ci occuperemo soprattutto dell'Egitto tolemaico, sul quale è disponibile qualche informazione in più.

Agricoltura e allevamento. I Tolomei misero a coltura molti terreni vergini, drenando terreni paludosi e irrigando margini di deserto; in ambedue i casi erano essenziali le macchine per il sollevamento dell'acqua (cfr. §4.5), come lo erano per regolare le piene del Nilo (cioè per irrigare i terreni fertili negli anni nei quali la piena era insufficiente e per drenarli nel caso opposto). Il progresso tecnologico in questo settore doveva essere continuo: un papiro del III secolo a.C. contiene una lettera al re nella quale lo scrivente, altrimenti sconosciuto, sollecita l'uso di una nuova macchina per il sollevamento dell'acqua, di sua invenzione.[29] Gli ingegneri greci usavano sia i prodotti della tecnologia scientifica che la millenaria esperienza dei tecnici egiziani. Alcune notizie in proposito sono nell'archivio di Cleone e Teodoro, responsabili dei lavori di irrigazione del Fayûm all'epoca dei Tolomei Filadelfo ed Evergete I.[30]

> Il Fayûm cambiò rapidamente da una terra paludosa e desertica a un'ampia distesa di terreni da grano, al di là dei quali [...] si stendevano frutteti, vigneti, oliveti, palmeti e orti. Né possiamo dubitare che la stessa attività si svolgesse nella regione di Alessandria e in tutte le terre paludose del Delta.[31]

Rostovzev, dopo avere accennato all'uso di innovazioni tecnologiche per estendere le aree coltivate, scrive anche:

> Ci si domanda fino a qual punto in questo periodo l'Egitto abbia beneficato di consimili invenzioni tecniche. Su questo punto le nostre informazioni sono scarse: non esistono quasi affatto attestazioni letterarie; i papiri menzionano occasionalmente strumenti agricoli, ma i loro dati non sono di facile interpretazione; e gli strumenti medesimi, sebbene rinvenuti in gran copia, non sono stati mai raccolti, descritti ed analizzati sotto l'aspetto tecnico e storico.[32]

È qui spiegata una delle origini del luogo comune della assenza di tecnologia scientifica nell'antichità. Sappiamo tuttavia che furono diffuse in tutto il mondo ellenistico le migliori tecni-

[29] P. Edfu 8. L'autore della lettera chiede di essere assegnato allo stratega Aristone, che coordinava presumibilmente i lavori idraulici. Potrebbe trattarsi dello stesso Aristone al quale Filone di Bisanzio dedica la sua *Pneumatica* (cfr. [Prager: Filone], p. 132).

[30] P. Petr. iii.

[31] [Rostovzev ET], p. 543. Sui lavori di bonifica cfr. anche [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 379-380.

[32] [Rostovzev SESME], vol.I, p. 381.

che esistenti nelle varie regioni degli antichi imperi (ad esempio la seminatrice, già nota in Mesopotamia, fu introdotta in Egitto), si perfezionarono gli attrezzi esistenti e ne furono progettati alcuni completamente nuovi. Un progresso importante degli strumenti agricoli, dovuto ai progressi delle industrie estrattive e metallurgiche, fu la diffusione di macchine agricole con parti in ferro, prima estremamente raro sia in Egitto che in Grecia. Sugli attrezzi nuovi si sa molto poco: sembra che la trebbiatrice detta *norag* sia di epoca ellenistica e Plinio accenna a macchine mietitrici, certamente ellenistiche, che potevano mietere muovendo automaticamente pettini e lame.[33] Si tratta di un altro meccanismo che, come la *sakiyeh* o la catapulta automatica, era capace di trasformare un semplice moto di rotazione in un'azione complessa, tradizionalmente eseguita da uomini.

Molte piante, della più diversa provenienza, furono acclimatate per la prima volta nei vari regni ellenistici e delle piante già esistenti si migliorò la qualità usando semi importati da vari paesi.[34] Nell'Egitto ellenistico il vero grano (*durum triticum*) sostituì la spelta (*triticum dicoccum*) e ne furono acclimatate diverse varietà.[35] Il numero di acclimatazioni e ibridazioni riuscite durante il regno dei primi Tolomei indica la presenza di una sperimentazione sistematica. Si può pensare che questa attività sperimentale fosse diretta da botanici; la stretta relazione tra gli studi di botanica e lo sviluppo delle tecniche di coltivazione è infatti chiara nelle opere botaniche di Teofrasto e la particolare conoscenza delle piante egiziane mostrata in tali opere è una chiara indicazione che sin da allora gli studiosi alessandrini fossero delle autorità in materia. Sappiamo inoltre che la viticultura fu riformata in conformità alle indicazioni contenute nell'opera di Teofrasto.[36] A questo riguardo R. J. Forbes scrive:

> Teofrasto crede che le piante traggano il loro spirito vitale (pneuma) dal suolo e lo portino in alto attraverso il midollo, insieme con l'acqua. Da questa teoria egli deduce il modo corretto per tagliare le barbatelle della buona vigna; le condizioni nelle quali esse dovrebbero essere piantate; la porosità e l'umidità del suolo e la cura delle barbatelle. Egli è contrario all'innesto, ma discute usi e metodi della potatura. Nonostante le lacune delle sue cognizioni di fisiologia della pianta, i suoi consigli sono generalmente buoni e spesso così conformi alle teorie moderne che noi possiamo riflettere su quanto poco l'esperienza pratica dei viticoltori abbia progredito negli ultimi

[33] Plinio, *Naturalis historia*, XVIII, 296.
[34] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 376-377; vol. III, pp.248-256.
[35] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. I, p. 385.
[36] Teofrasto, *De causis plantarum*, III, 11.1-16.4.

2200 anni. Questo dimostra che il genio greco portò la viticultura a un livello veramente notevole.[37]

I successi della viticultura greca potrebbero forse essere attribuiti, più che genericamente al "genio greco", all'uso del nuovo metodo scientifico. Gli scienziati ellenistici, come abbiamo visto anche nel caso di Erofilo, non concepivano le proprie teorie come verità assolute, ma come modelli elaborati per fini specifici. Se, come è probabile, giudicavano la bontà delle teorie in base alla loro utilità e semplicità, si stupirebbero molto leggendo che quella esposta da Teofrasto sulla viticultura è oggi considerata "lacunosa" da chi, avendo elaborato conoscenze estremamente più complesse, segue ancora i suoi consigli.

Nel settore dell'allevamento si ottennero progressi acclimatando animali, allevando nuove specie (come lepri, ghiri e cinghiali[38]) e usando nuovi foraggi.[39] Innovazioni dello stesso tipo (come le analoghe in agricoltura) erano state introdotte sin dal neolitico, ma su una scala temporale completamente diversa. Anche in questo caso l'enorme accelerazione delle innovazioni in epoca ellenistica è evidentemente dovuta all'uso sistematico della sperimentazione, che è documentato almeno nei casi già accennati. Forse è ellenistica anche l'introduzione delle incubatrici in pollicultura.[40]

Le razze furono migliorate sistematicamente con incroci. Sappiamo, ad esempio, che i Tolomei migliorarono le razze degli asini con importazioni dalla Siria e che Tolomeo II Filadelfo ebbe in regalo vari animali da Tubia, capo della Transgiordania.[41] Si era pensato che il regalo avesse il fine di arricchire lo zoo, ma secondo Rostovzev lo scopo era quello di migliorare le razze.[42] Le due opinioni non sono in contraddizione, anche perché nel passo di Ateneo in cui si accenna allo zoo istituito dal Filadelfo l'argomento è introdotto proprio a proposito delle nuove razze di uccelli lì ottenute.[43] Lo zoo era probabilmente la struttura

[37] [Forbes AB], p. 135.

[38] Cfr. Varrone, *De re rustica*, III, ii, 13 sgg.

[39] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, p. 284.

[40] L'idea dell'incubazione artificiale delle uova in un ambiente riscaldato, mantenuto a temperatura costante, è riferita da Plinio (*Naturalis historia*, X, 154). All'inizio dell'età moderna Thomas More riprese l'idea, parlandone come di un mirabile procedimento adottato dagli abitanti di Utopia (*Utopia*, libro II), ma le incubatrici sarebbero rimaste un puro ricordo letterario ancora per secoli.

[41] P. Cairo Zen. 59075.

[42] [Rostovzev SESME], vol. I, p.378. Rostovzev osserva che gli animali donati sono per lo più domestici. Sulle nuove razze ottenute con ibridazioni cfr. anche [Rostovzev SESME], vol. III, p. 248.

[43] Ateneo parla di incroci tra fagiani e galline faraone (*Deipnosophistae*, XIV, 654, b-c).

a disposizione degli zoologi del Museo perché vi dirigessero gli esperimenti sugli animali, in particolare quelli di ibridazione. Si può congetturare che le teorie zoologiche riecheggiate da Lucrezio[44] risalissero anche a questa attività scientifica.

In epoca ellenistica, come nella Grecia classica, miele e cera avevano usi molto vari ed estesi e l'apicultura aveva quindi una notevole importanza economica. Lo sviluppo, anche in questo campo, di nuove conoscenze (come, del resto, più in generale, in entomologia[45]) è dimostrato dall'esistenza di diversi trattati di apicultura: Plinio ne cita due: di Aristomaco di Soli, che avrebbe dedicato la vita allo studio delle api, e di Filisco di Taso.[46] Non abbiamo queste opere, ma una bella pagina di Pappo fornisce un indizio sul livello scientifico di questi studi e un'ulteriore prova delle interazioni tra scienza esatta e scienze empiriche. Pappo osserva che le api, nella costruzione delle celle esagonali dei favi, risolvono un problema di ottimizzazione, in quanto tra i poligoni regolari con i quali si può pavimentare un piano l'esagono è quello con il massimo rapporto area/perimetro e pertanto è quello che permette di usare la minima quantità di cera a parità di contenuto di miele.[47] L'osservazione riferita da Pappo fu ripresa più volte in epoca moderna, finendo col diventare un luogo comune.

Gli esempi precedenti mostrano che la rivoluzione scientifica rese possibili mutamenti di grande rilievo nell'agricoltura, ma non abbiamo informazioni dirette sufficienti per capire fino a che punto le nuove possibilità furono effettivamente usate. Per stimare la ricaduta agricola della tecnologia scientifica dobbiamo usare argomenti indiretti. Un indizio dell'applicazione di conoscenze teoriche all'agricoltura è fornito dal moltiplicarsi dei trattati di agronomia. Varrone scrive che in lingua greca ve ne erano cinquanta e ne nomina quarantanove.[48] Non se ne è conservato nessuno e non ne abbiamo neppure citazioni attendibili. È certo che essi fossero all'origine di tutte le conoscenze romane sull'argomento, ma vi sono ben poche speranze di ricostruire parti significative del loro contenuto sulla base degli scritti degli eruditi romani.[49]

[44] Cfr. sopra, pp. 173-174.

[45] Un indizio sull'introduzione e il successivo abbandono, anche in questo settore, del metodo sperimentale è fornito da Plutarco, quando rimprovera gli studiosi (che pure utilizza come fonti) che avevano sistematicamente sezionato formicai per studiarne la struttura interna (Plutarco, *De sollertia animalium*, 96A-B).

[46] Plinio, *Naturalis historia*, XI, 19.

[47] Pappo, *Collezione*, V, 304-306.

[48] Varrone, *De re rustica*, I, i, 8 sgg.

[49] L'influenza degli agronomi ellenistici sugli scrittori romani è ricostruita in [Rostovzev SESME], vol. III, p. 274. Sulla base dei trattati ellenistici di agronomia, il cartaginese Magone aveva compilato un manuale, che fu tradot-

Naturalmente chi è convinto del carattere "speculativo" dello "spirito greco" può immaginare che il successo dei trattati di agronomia fosse dovuto non alla loro utilità nella pratica agricola, ma al diletto procurato dalla loro lettura. Vi è però un metodo oggettivo ed efficace per misurare il livello medio di una tecnologia agricola: l'uso di dati demografici.

I tre dati seguenti sono sufficientemente eloquenti.[50]

a) La popolazione dell'Egitto tardo-faraonico è stimata circa tre milioni.

b) In un rapporto sulla capacità produttiva dell'Egitto pubblicato nel 1836 si calcola in otto milioni la popolazione massima che l'Egitto avrebbe potuto nutrire se tutte le terre coltivabili fossero state sfruttate in modo ottimale.[51] In seguito alle riforme economiche e al conseguente incremento demografico, nel 1882 la popolazione egiziana arrivò a sei milioni e ottocentomila abitanti.

c) La popolazione di Alessandria alla metà del I secolo a.C. è stimata in cinquecentomila abitanti.[52] Nel I secolo d.C. Flavio Giuseppe calcola la popolazione del resto dell'Egitto (in base a dati fiscali e quindi presumibilmente per difetto) in sette milioni e mezzo.[53]

Si può aggiungere che l'Egitto era un importante esportatore di prodotti agricoli e in particolare di frumento. Torneremo su questo punto.

Industrie estrattive e metallurgiche. Alcuni progressi delle industrie estrattive dovuti alla tecnologia scientifica sono facilmente intuibili. In particolare le nuove macchine per il sollevamento dell'acqua, assicurando un drenaggio delle gallerie molto più efficiente, permisero di aumentare la profondità di sfruttamento delle miniere.

Il migliore sistema di drenaggio noto in età imperiale è quello delle miniere di rame di Rio Tinto, in Andalusia. Otto coppie di ruote idrauliche poste su otto livelli diversi, funzionando in serie, permettevano di superare un dislivello di circa trenta metri. L'impianto di Rio Tinto è in genere citato come una realizzazione della tecnologia *romana*. Così ne parla Bromehead nel suo saggio sulle antiche miniere,[54] nel quale però è riportato anche un passo di

to da Cassio Dionisio. Diofane di Bitinia, che aveva scritto un riassunto di questa traduzione, fu l'unica fonte di Varrone e di tutti gli altri scrittori romani sull'argomento.

[50] I dati sono raccolti in [Bowman], p. 21.

[51] [Lane], p. 34.

[52] Questa stima si basa soprattutto sull'affermazione di Diodoro Siculo (*Bibliotheca historica*, XVII, lii, 6) che i residenti liberi erano circa trecentomila.

[53] Flavio Giuseppe, *Bellum judaicum*, II, 16, 385.

[54] [Bromehead], p. 7.

Plinio che descrive una miniera drenata giorno e notte da lunghe file di schiavi con secchie a mano.[55] La chiave del mistero di questa tecnologia *romana* così variabile la si può trovare, volendo, in un altro passo dello stesso saggio, dove è detto:

> I Romani, come era nelle loro abitudini, sfruttarono le miniere della Britannia impiegando per lo più i sistemi e la mano d'opera locale, fornendo solo supervisori e capisquadra secondo le necessità e riscotendo i tributi.[56]

Le miniere di Rio Tinto erano state già sfruttate dai Cartaginesi.[57] Si può quindi supporre che i Romani avessero lasciato in funzione anche a Rio Tinto un sistema locale, preesistente alla conquista romana della Spagna (della fine del III secolo a.C.), anche perché l'uso della tecnologia ellenistica da parte dei Cartaginesi nel drenaggio delle miniere spagnole è descritto da Diodoro Siculo.[58]

Lo stesso Bromehead, a proposito delle tecniche per lo scavo della roccia, scrive:

> Benché ne parlino sia Plinio che Diodoro Siculo, è poco verosimile che sia stato usato l'aceto, in quanto non avrebbe avuto alcun effetto tranne che, in lieve misura, sul calcare.[59]

Anche l'*aceto* di cui parlavano Plinio e Diodoro, come quelli del papiro di Leyda e di Tito Livio, era stato probabilmente un ὄξος poco consigliabile ai buongustai.[60]

Lo sviluppo della chimica empirica modificò il trattamento dei minerali. Su questo argomento le nostre migliori informazioni riguardano le miniere di piombo argentifero del Laurio, presso Atene. Studi basati sull'esame delle scorie hanno permesso infatti di ricostruire i procedimenti lì usati per l'estrazione dell'argento. Ecco come i risultati degli studi sono riassunti da R. J. Forbes:

> Sembra che presso gli antichi il principio del processo Pattinson, del XIX secolo, fosse in parte già conosciuto. Allorché si fonde del

[55] Plinio, *Naturalis historia*, XXXIII, 97.

[56] [Bromehead], p. 10.

[57] Cartagine aveva conquistato la regione proprio per sfruttarne le miniere. Resti cartaginesi sono ancora sul posto.

[58] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, V, xxxvi-xxxvii. Diodoro descrive lo sfruttamento delle miniere da parte dei Cartaginesi, che avevano introdotto anche l'uso di sistemi di coclee in serie. All'epoca romana è fatto risalire l'uso di grandi masse di schiavi. Per le relazioni tra Cartagine e Alessandria cfr. anche [Rostovzev SESME], vol.I, pp. 413-415

[59] [Bromehead], p. 8, n. 1.

[60] Cfr. sopra, pp. 177-178.

piombo ricco di argento, i cristalli che si formano all'inizio del raffreddamento sono costituiti da piombo quasi puro, per cui la parte liquida viene ad arricchirsi di argento. Tale procedimento può essere ripetuto fino a che il contenuto di argento non raggiunga una percentuale compresa tra l'1% e il 2%. La lega così ottenuta può essere quindi coppellata per ottenere l'argento, e il litargirio formatosi può essere trasferito nuovamente ai forni di fusione. Studi recenti hanno dimostrato che ciò era quanto avveniva nel Laurio ed è stato accertato che gli antichi Greci erano in grado di disargentare il piombo in modo tanto efficace da lasciare in esso solo lo 0,002 % del prezioso metallo.[61]

Nonostante la cautela dell'esordio, la descrizione di quella che gli studi hanno, secondo Forbes, "dimostrato" essere l'antica tecnica è una chiara esposizione del "principio del processo Pattinson". Resta da capire chi siano gli "antichi" di cui si parla. Leggiamo per questo un passo dedicato alle miniere del Laurio nel saggio di Bromehead già citato:

Talvolta, però, tutto il minerale veniva asportato, e i pilastri per sorreggere il soffitto venivano costruiti con gli scarti. Sotto Licurgo, nel 338 a.C., fu promulgata una legge che proibiva la rimozione dei pilastri, [...] Strabone dice tuttavia che ai suoi tempi (?63 a.C.-?21 d.C.) i depositi di scorie erano stati riutilizzati per ottenere metallo, rimuovendo i pilastri di cui dicevamo.[62]

Perché divenga conveniente riutilizzare delle scorie deve intervenire evidentemente un miglioramento radicale delle tecniche di raffinamento. La scoperta dei procedimenti prima esposti deve quindi essere avvenuta nel periodo intercorso tra Licurgo e Strabone. Cioè nel periodo ellenistico. Dobbiamo quindi ascrivere anche il "processo Pattinson" alla chimica empirica ellenistica.

Dalle poche notizie che abbiamo sui procedimenti della metallurgia emergono alcune innovazioni tecnologiche anche nel settore della lavorazione dei metalli. Polibio, ad esempio, ci parla di nuovi mantici da fabbro, forse connessi alla pompa di Ctesibio.[63]

In che misura la produzione di metalli mutò grazie ai progressi nelle tecniche di scavo, drenaggio, estrazione e lavorazione? Una risposta parziale è fornita dalla constatazione che nel

[61] [Forbes metall.], pp. 44-45.
[62] [Bromehead], p. 3. Il riferimento è a Strabone, *Geografia*, IX, i, 23.
[63] Polibio, *Storie*, XXI, 28, 15. Poiché i più antichi mantici da fabbro usati in Estremo Oriente erano simili alla pompa di Ctesibio ed erano quindi probabilmente di origine ellenistica, l'ipotesi che i mantici di cui parla Polibio fossero dello steso tipo è plausibile (cfr. [Bromehead], p. 5).

primo periodo ellenistico il ferro, prima riservato essenzialmente alla costruzione di armi e coltelli, divenne di uso comune per la costruzione di attrezzi e macchine di ogni genere. Ciò è provato particolarmente bene per l'Egitto dei primi Tolomei, nonostante il ferro vi dovesse essere importato.[64]

Produzione del vetro. In epoca ellenistica si producono qualità nuove di vetro e si introduce la tecnica della soffiatura (che in Siria evolve nella tecnica della soffiatura in stampi). Si può forse congetturare una relazione tra questa nuova tecnica e la pneumatica. In questo settore, come in altri, appaiono "marchi di fabbrica". Il più famoso produttore di oggetti di vetro di epoca imperiale è stato Ennio. Abbiamo ancora molti oggetti con il suo marchio. Si trattava di una azienda che oggi diremmo multinazionale: aveva una "filiale" a Roma, ma la sede principale era in Siria. Aziende analoghe operavano nel settore della ceramica: anfore, lampade e brocche con il marchio di Aristone sono state trovate in tutto il mondo ellenistico.[65]

Industrie chimiche. Tra le industrie che operavano trasformazioni della materia, particolarmente importanti erano ad Alessandria quelle dei farmaci, degli unguenti e dei profumi. Queste produzioni erano basate sia sulle nuove conoscenze mediche e botaniche che sulla nuova scienza della chimica; vi si lavoravano infatti sostanze non solo vegetali e animali, ma anche minerali. Ad esempio alcuni dei farmaci citati da Dioscoride sono di origine minerale, come il solfuro di rame (detto rame bruciato) e il verderame (di cui si può sospettare l'uso anche in agricoltura). La produzione di coloranti di origine minerale inizia non solo ad Alessandria, ma anche in altre città ellenistiche. A Pergamo l'estrazione di sostanze coloranti minerali iniziò ad essere praticata, su scala relativamente grande, all'epoca dei primi Attalidi.[66]

Industrie tessili. La relazione tra chimica empirica e metodi di tintura è ovvia. Non abbiamo dati tecnici sui telai, ma sappiamo che l'Egitto era divenuto un importante produttore di stoffe e che ad Alessandria vi erano metodi particolari sia di tintura che di tessitura; anche le sete provenienti dall'Oriente vi erano ritessute,[67] probabilmente preparando prodotti misti

[64] In particolare un esteso uso del ferro nella tenuta di Apollonio è documentato nell'archivio di Zenone; cfr. in particolare P. Cairo Zen. 59782a. Cfr. anche [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 381-382.

[65] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, p. 304.

[66] Cfr. [Rostovzev SESME], vol.I, p. 587.

[67] Cfr. [Johnson], p. 338. Riguardo ai metodi particolari di tintura (sui quali le fonti non danno ulteriori indicazioni), si può forse sospettare che gli inventori delle prime produzioni in serie e dei torchi fossero arrivati a quella tecnica della "stampa" che si ritrova dopo qualche secolo in paesi asiatici che

più economici. Vengono usate anche fibre di origine minerale.[68]

Produzione della carta. Nel regno dei Tolomei era molto importante la produzione della carta,[69] della quale, essendo la materia prima il papiro, l'Egitto aveva il monopolio. Questa produzione ci interessa anche per gli indizi che fornisce sulla diffusione della cultura. Durante il regno di Tolomeo II Filadelfo vi fu un grande aumento del consumo e, allo stesso tempo, una forte diminuzione del prezzo;[70] a quel tempo la carta era usata non solo per scrivere, ma anche, come oggi, per confezionare pacchi, come risulta da un passo della corrispondenza di Zenone.[71] È facile dedurne che anche in questo settore dovettero esservi miglioramenti radicali nelle tecniche produttive.

Industrie alimentari. La nuova tecnologia permise per la prima volta l'uso nelle produzioni alimentari di fonti di energia naturale. Nella produzione dell'olio le presse a trave vennero sostituite dai molto più efficienti torchi. Non sappiamo quante altre innovazioni tecnologiche furono introdotte nell'industria alimentare, ma il rapporto tra queste novità tecnologiche e la scienza è provato dal fatto che una delle nostre principali fonti (anche se tarda e incompleta) su presse e frantoi è lo scienziato Erone di Alessandria.[72]

È naturale chiedersi se sorsero impianti di grandi dimensioni, basati sulla nuova tecnologia e sullo sfruttamento di fonti naturali di energia. Di solito la risposta a questa domanda è negativa per tutta l'"antichità". Si conoscono però, per quanto riguarda l'età imperiale, alcune eccezioni. L'impianto industriale più rilevante su cui siamo informati è quello, per la produzione della farina, di Barbegal, presso Arles, dove si sono trovati resti imponenti: il grano era macinato da 32 mole, azionate da 16 ruote idrauliche verticali, disposte a coppie su otto livelli diversi. Molti hanno pensato che la produzione fosse esportata, anche se R. Sellin ha sostenuto che si trattasse di un impianto volto a soddisfare i bisogni locali.[73]

L'epoca della prima costruzione dell'impianto non è chiara. Sellin la pone nel IV secolo d.C., ma in realtà alcune parti dei

avevano avuto scambi commerciali con l'ellenismo (e in cui vediamo usare i torchi descritti da Erone).

[68] Furono usate in particolare fibre di amianto per la preparazione di tessuti incombustibili (Plutarco, *De defectu oraculorum*, 434A-B).

[69] Non vi è alcun motivo per riservare il termine carta al prodotto ottenuto dal legno di piante d'alto fusto escludendo i fogli (di qualità superiore) ottenuti dal papiro; anche perché la parola italiana viene dal greco χάρτης (*rotolo di foglio di papiro*) e una distinzione analoga sarebbe improponibile in inglese.

[70] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. I, p. 324.

[71] P. Col. Zen. 4.

[72] Erone, *Meccanica*, III, ii;13-20.

[73] [Sellin]. Sellin arriva a questa conclusione supponendo, tra l'altro, che le ruote girassero a vuoto per la metà del tempo e che gli abitanti di Arles con-

resti attuali sembrano risalire a un'epoca compresa tra il I secolo a.C. e il I secolo d.C.[74] Le rovine mostrano chiaramente le tracce di una manutenzione protrattasi per secoli e la stratificazione di interventi risalenti a epoche diverse.

Strabone ricorda sia la tradizionale abilità dei marsigliesi nella tecnologia meccanica[75] che il controllo esercitato da Marsiglia sulla zona delle bocche del Rodano (in cui si trova Barbegal).[76] Queste informazioni, congiunte all'abitudine romana di lasciar sopravvivere le tecniche locali e alla presenza dello stesso schema di otto coppie di ruote idrauliche su otto livelli, con altri scopi, nelle miniere di Rio Tinto (che i Romani sottrassero ai cartaginesi alla fine del III secolo a.C.), possono far nascere il sospetto che i Romani avessero trovato conveniente anche a Barbegal lasciar sopravvivere una tradizione tecnologica locale.

Si conoscono due altri impianti con ruote idrauliche multiple, paragonabili a quello di Barbegal: uno è in Israele, presso l'antica Cesarea, l'altro in Tunisia (a Chemtou). Anche le altre grandi industrie alimentari di epoca imperiale di cui si ha notizia sono localizzate in zone già ellenizzate nel III secolo a.C., in particolare in Africa settentrionale. Tra gli oleifici con una lavorazione su scala industriale si possono citare quello di Djemila, in Tunisia, e quello di Kherbert-Agoub, in Algeria, dove vi erano ventuno piattaforme per torchi; sia lì che a Bir Sgaoum una intera città era sorta intorno alla fabbrica.[77] Non si ha notizia di alcuna industria "romana" confrontabile con queste nei pressi di Roma.

6.3. *I risultati economici*

Se la nascita della scienza portò a un progresso tecnologico generalizzato dell'industria manifatturiera, se ne debbono vedere gli effetti nei risultati economici.

Nel primo periodo ellenistico grandi ricchezze furono accumulate non solo dai sovrani ma anche dai membri della borghe-

sumassero in media 350 grammi giornalieri a testa di farina prodotta dal mulino. Egli osserva anche che, secondo le sue stime, la potenza di ciascuna ruota idraulica non era superiore a quella attuale di una motocicletta di 250 cc. L'impietosa osservazione di Sellin evidenzia il basso livello di civiltà tecnologica di chi devasta il proprio ambiente sprecando con poche corse in motocicletta l'energia sufficiente a produrre il cibo per un'intera città. Questo sistema, basato sullo sfruttamento di fonti d'energia non rinnovabili, avrà però certamente una durata trascurabile su scala storica.

[74] Questa è l'opinione espressa dal direttore degli scavi, prof. Philippe Leveau, in una conversazione riferitami da Enzo Olivieri.

[75] Strabone, *Geografia*, IV, i, 5.

[76] Strabone, *Geografia*, IV, i, 8.

[77] Cfr. [Gille macchine], p. 649.

sia.[78] La mobilità sociale generata dalle nuove possibilità di arricchirsi si riflette nelle concezioni etiche dei filosofi, in modo analogo a quanto avvenne nell'Età Moderna con il sorgere del capitalismo. Crisippo scrive:

> Pazzi sono coloro che non tengono in conto, e non cercano di procacciarsi, ricchezza, salute, tranquillità e completo benessere del corpo.[79]

Lo sviluppo economico è particolarmente evidente nel caso di Alessandria, che, fondata da Alessandro nel 331 a.C., divenne rapidamente la maggiore città del mondo conosciuto. L'attivo commerciale dell'Egitto tolemaico (la cui ricchezza fu proverbiale in tutta l'antichità) proveniva soprattutto da Alessandria, dove era presente una ricca borghesia;[80] alla metà del I secolo a.C. Diodoro Siculo la dice

> la prima città del mondo civile, sicuramente di gran lunga superiore a tutte le altre per eleganza, estensione, ricchezza e lusso.[81]

Anche durante la dominazione romana Alessandria fu il principale centro economico dell'impero. La sua popolazione, che alla metà del I secolo a.C. era di circa cinquecentomila abitanti,[82] secondo alcuni studiosi era raddoppiata all'epoca di Caligola.[83] Dione di Prusa, in una orazione tenuta probabilmente durante il regno di Vespasiano, dice agli alessandrini:

> Non solo avete il monopolio dei traffici marittimi dell'intero Mediterraneo [...] ma sono alla vostra portata sia il Mar Rosso che l'Oceano Indiano [...] Alessandria si trova infatti al crocevia del mondo [...] come se esso fosse un immenso mercato al servizio di un'unica città [...][84]

Le affermazioni di Dione sollevano un'importante questione: Alessandria, nel suo linguaggio iperbolico, disponeva del mondo come mercato per le proprie industrie o per i propri traffici? In altre parole: quanta parte della ricchezza di Alessandria aveva un'origine industriale e quanta derivava invece dal commercio di transito? Non abbiamo informazioni sufficienti per una risposta certa,[85] ma in favore della prevalenza

[78] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, pp. 229-245.
[79] [SVF], vol. III, fr. 138.
[80] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, p. 240. Rostovzev, a proposito della borghesia alessandrina, afferma che *purtroppo non sappiamo nulla intorno alle sorgenti della sua ricchezza.*
[81] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, XVII, lii, 5.
[82] Cfr. sopra, p. 190.
[83] Cfr. [Rostovzev SESME], vol. III, p. 225.
[84] Dione di Prusa, *Orazioni*, 32. 36.
[85] Fraser propende per la prevalenza del commercio, ma considera la questione aperta ([Fraser], vol. I, p. 143).

dell'origine industriale si possono portare gli argomenti seguenti:

• Le poche informazioni che abbiamo sul commercio alessandrino[86] sono concordi nell'indicare che l'enorme traffico marittimo di Alessandria fosse formato soprattutto da importazione di materie prime ed esportazione di prodotti finiti. Sappiamo, in particolare, che Alessandria importava oro, ferro, stagno, argento, rame e varie sostanze usate nella produzione di farmaci, unguenti e profumi, che esportava insieme a coloranti, tessuti, prodotti di vetro, carta di papiro e oggetti di metallo: tutte merci di produzione locale. Sembra certo, comunque, che l'industria alessandrina fosse molto più sviluppata di quanto sia direttamente documentabile oggi.[87]

• La geografia non consente ad Alessandria una funzione di transito nell'ambito del Mediterraneo. Il commercio di transito poteva riguardare solo prodotti scambiati con il Sud o con l'Oriente. Le relazioni con il Sud non erano però vere relazioni commerciali, limitandosi all' approvvigionamento di oro nelle miniere di proprietà dei Tolomei e a spedizioni di caccia agli elefanti.

• Alessandria ebbe certamente una funzione di mediazione commerciale tra il mondo mediterraneo e l'Arabia e l'India. Questa funzione, svolta in concorrenza con le rotte commerciali che collegavano Arabia e India con il regno dei Seleucidi, sembra però essere in stretta relazione con l'industria di trasformazione. Abbiamo visto infatti che sia nel caso delle industrie dei cosmetici, dei farmaci e dei profumi, sia in quello delle industrie tessili i prodotti importati dall'Oriente erano riesportati solo dopo essere stati trasformati dalle industrie alessandrine. Inoltre il commercio con l'India si sviluppò solo alla fine del II secolo a.C., mentre non sembra rilevante prima di allora.

• I rapporti privilegiati, nel primo periodo tolemaico, tra Alessandria e Rodi, che era il principale centro mercantile ellenistico, erano fondati proprio sulla complementarità delle due economie.[88]

• Una informazione sul commercio con l'Italia nel I secolo a.C. è fornita casualmente da Cicerone, che, parlando di un gruppo di navi giunte a Pozzuoli da Alessandria, le descrive colme di carta, tessuti di lino e oggetti di vetro: si tratta di tre prodotti dell'industria alessandrina.[89]

[86] Molte delle informazioni disponibili su questo argomento sono in [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 400-418 e [Fraser], vol. I, pp. 132-188.

[87] È questa anche l'opinione espressa in [Fraser], vol. I, p. 143.

[88] Cfr. [Fraser], vol. I, pp. 162-169; in particolare la complementarità delle due economie è sottolineata a p. 164.

[89] Cicerone, *Pro Rabirio Postumo*, 39-40.

• La lettera di Demetrio al dieceta Apollonio, che abbiamo citato a p. 180, documenta la presenza ad Alessandria, all'epoca del Filadelfo, di mercanti stranieri che percorrevano anche il resto del paese per fare acquisti. Ciò sembra indicare che almeno a quel tempo (prima metà del III secolo a.C.) la capacità industriale dell' Egitto superasse quella commerciale.

6.4. *Scienza, tecnologia e schiavitù*

Il rapporto tra scienza e tecnologia ellenistiche appare chiaro se si guarda alla loro struttura complessiva.

La scienza esatta ha al suo centro la geometria, che fornisce alle altre teorie scientifiche (tra le quali sono la meccanica, l'astronomia, la geografia matematica, l'ottica, l'idrostatica e la pneumatica) risultati, procedimenti e mezzi di calcolo.

I principali problemi tecnologici dell'epoca riguardano l'ingegneria meccanica (basata sulla nuova *scienza delle macchine*), il rilevamento (basato su trigonometria e ottica), la navigazione (che usa l'astronomia, la geografia matematica e le tecniche di rilevamento), l'ingegneria navale (basata anche sull'idrostatica), le tecniche di drenaggio, irrigazione e distribuzione dell'acqua (basate sull'ingegneria meccanica e l'idraulica, a sua volta basata sulla pneumatica), le industrie estrattive (basate sulle tecniche di drenaggio e sulla chimica empirica) e l'industria manifatturiera, che, oltre a usare presse, frantoi, magli e telai di nuovo tipo, può avvalersi anche di fonti naturali di energia.

I risultati della nuova "tecnologia scientifica" sono documentati in diversi casi: sappiamo di navi di dimensioni senza confronti nel passato, di sistemi di distribuzione idrica basati su condotte forzate e meccanismi automatici di sollevamento dell'acqua, della generalizzazione dell'uso del ferro, dell'aumento della superficie coltivabile e del sorgere di nuove industrie. I progressi dell'agricoltura permisero di triplicare la popolazione dell'Egitto e Alessandria, principale centro della rivoluzione scientifica, divenne allo stesso tempo il maggiore centro industriale e il maggiore esportatore di manufatti.

Gli studiosi che hanno negato ogni relazione tra scienza e tecnologia nell' "antichità" si sono spesso chiesti come mai gli "Antichi", che avevano creato, tra l'altro, la geometria, la meccanica, l'idrostatica, la pneumatica e l'ottica, non si fossero accorti delle potenzialità tecnologiche della loro scienza. A volte, come nel caso delle osservazioni di Dijksterhuis su Erone, [90] il dubbio è acuito dalla constatazione che gli scienziati ellenistici avevano

[90] Cfr. sopra, p. 144.

in realtà creato anche gran parte della tecnologia sulla quale l'Europa ha basato la propria rivoluzione industriale, ma, stranamente, solo "per gioco", senza alcuna consapevolezza della sua utilità.

La risposta più frequente alle domande precedenti consiste nell'osservare che nell' "antichità" la presenza della schiavitù toglieva ogni interesse al progresso tecnico. Questa risposta è di solito illustrata con citazioni di Romani (o, a volte, di Greci dell'età classica) che, mostrando disprezzo per la tecnologia, teorizzano la schiavitù. Un'altra risposta, connessa alla prima, è che lo stesso effetto lo avrebbe avuto la disoccupazione. Uno degli aneddoti più citati a questo proposito riguarda l'imperatore Vespasiano, che rifiutò l'installazione di un paranco idraulico dicendo di non voler "togliere lavoro al popolino di Roma".[91]

Poiché non fu certo Vespasiano a stimolare lo sviluppo scientifico ellenistico, per vedere cosa c'è di vero negli argomenti precedenti è preferibile esaminare la schiavitù e la disoccupazione non a Roma, ma, ad esempio, nell'Egitto tolemaico. L'esame conferma l'idea che la schiavitù ostacoli il progresso tecnologico. La schiavitù nel regno dei Tolomei, infatti, non aveva affatto l'importanza né le caratteristiche che ebbe nella Grecia classica e a Roma.[92]

Nell'Egitto tolemaico non erano impiegate masse di schiavi né in agricoltura né nelle miniere:[93] i contadini regi erano liberi e sembra che nelle miniere il lavoro fosse compiuto da lavoratori salariati.[94] Anche gli operai che lavoravano nei frantoi statali erano liberi e probabilmente non erano usati schiavi neppure nella marina da guerra.[95] In conclusione, non sappiamo di alcuna attività economica basata in modo essenziale sulla schiavitù, che nell'Egitto ellenistico era essenzialmente usata in ambito domestico. Dall'archivio di Zenone apprendiamo inoltre che il personale al servizio privato di Apollonio era costituito sia di schiavi che di persone libere e che ambedue le categorie

[91] Svetonio, *Vite dei dodici cesari, Vespasiano*, 18.

[92] Il problema dell'estensione e del peso economico della schiavitù nell'Egitto tolemaico è stato a lungo dibattuto. Molte informazioni sono in [Rostovzev SESME]. Un'opera più recente, alla quale si rimanda anche per una bibliografia sull'argomento, è [Bieżuńska-Małowist].

[93] Cfr., ad es., [Bieżuńska-Małowist], p. 228.

[94] Sembra potersi trarre questa conclusione (oltre che da argomenti *ex silentio*) da un passo delle *Argonautiche* di Apollonio Rodio (II, 1002 sgg.) in cui i famosi minatori Calibi sono descritti come persone libere, che traggono dal proprio lavoro i mezzi di sussistenza. È plausibile (come osservato in [Rostovzev SESME], vol. III, p. 306) che Apollonio attribuisse ai Calibi le condizioni di lavoro a lui note: cioè quelle dell'Egitto del III secolo a.C.

[95] Sulla probabile (ed interessante) assenza di schiavi usati come rematori nella flotta, cfr. [Bieżuńska-Małowist], p. 177.

ricevevano compensi in denaro. In alcuni papiri si accenna a proteste del personale per i ritardi nei pagamenti.[96]

Westermann sostenne per primo che la politica dei Tolomei tendesse a frenare la schiavitù.[97] Le sue tesi sono considerate *estremiste* dalla Bieżuńska-Małowist, che però afferma che "è indiscutibile che i Tolomei non promuovessero questa forma di proprietà e frenassero l'estendersi della schiavitù dovunque ciò avvenisse a danno della popolazione soggetta".[98]

Quanto alla disoccupazione, ecco come le condizioni di Alessandria sono descritte ancora nel IV secolo d.C. dall'autore latino dell'apocrifa *Lettera di Adriano*:

> Gli abitanti sono faziosi, presuntuosi e violenti; la città è ricca e prosperosa e nessuno vive nell'ozio. Chi soffia il vetro, chi fabbrica carta di papiro, chi tesse il lino: tutti quanti, insomma, sembrano impegnati in un mestiere o in una professione. Gottosi, circoncisi e ciechi, tutti fanno qualcosa. Nemmeno gli storpi vivono nell'ozio. Hanno un solo dio: Mammona. Cristiani o ebrei, tutti venerano questa divinità. Se solo questa città avesse più solidi principi morali [...][99]

L'anonimo romano giudica moralmente riprovevole il lavoro, che considera la prova di una biasimevole brama di ricchezza, e appare molto irritato per la prosperità di Alessandria. A proposito della tecnologia alessandrina, che era presumibilmente all'origine di quella prosperità, vediamo cosa ne pensavano molto più recentemente gli autori di una ottima storia della scienza antica:

> La tecnica alessandrina era rivolta quasi tutta ai giuochi e ai divertimenti, sempre più costosi e ricercati, in cui un ambiente di ricchi parassiti cercava lenimento alla noia di vivere.[100]

L'argomento è motivato in modo opposto, ma la tecnologia alessandrina è ancora associata al vizio.[101]

[96] Cfr., ad es., P. Cairo Zen. 59028, nel quale l'arpista Satira si lamenta di non ricevere il denaro che le spetta.

[97] [Westermann].

[98] [Bieżuńska-Małowist], pp. 99, 118.

[99] Il passo è riportato in [Bowman], p. 245.

[100] [Enriques, de Santillana], p. 497.

[101] Oggi molta di tale tecnologia può apparire antiquata, ma ci si può formare un'idea di cosa si intendesse per *tecnologia moderna* ancora negli anni Trenta del XX secolo riguardando il film *Tempi moderni* di Chaplin, dove sono esibiti viti, ruote dentate, ingranaggi, cinghie di trasmissione, valvole, eliche, macchine a vapore, automi,...; Chaplin offre cioè una rassegna (certo inconsapevole) di elementi della tecnologia alessandrina.

7. Altri aspetti della rivoluzione scientifica

7.1. *Aspetti ideologici*

Le modifiche tecnologiche erano state per millenni lentissime e quasi sempre inconsapevoli. L'artigiano cercava di attenersi rigidamente alla tradizione, ma non sempre vi riusciva perfettamente; un meccanismo automatico di selezione, come nel caso della biologia, lasciando sopravvivere le variazioni utili, determinava una continua evoluzione. Tra i frutti di questo progresso inconsapevole vi sono non solo le innovazioni tecnologiche preistoriche ma anche molte di quelle degli antichi imperi: sia lo sviluppo della tecnologia mesopotamica della ruota[1] che la nascita della scrittura[2] e del sistema di numerazione posizionale[3] sembrano aver seguito questa strada.

La tecnologia scientifica mutò profondamente la situazione; le innovazioni tecnologiche divennero consapevoli e, poiché ne avvenivano molte e radicali nell'arco della stessa generazione, divenne evidente a tutti la loro importanza.

[1] Cfr., ad es.,[Childe], pp. 208-209.

[2] Il lungo processo con cui la scrittura si è probabilmente originata dal sistema di contabilità con gettoni è stato ricostruito da Denise Schmandt-Besserat; una sua breve descrizione di tale evoluzione è in [Schmandt-Besserat].

[3] Nel sistema di numerazione paleobabilonese un simbolo indicava multipli di diverse potenze della base a seconda della grandezza; ad esempio il simbolo usato per 4, se opportunamente ingrandito, poteva assumere il significato di 40 o di 400 (tale sistema era usato sia in base 10 che in base 60). L'uso di scrivere i simboli di dimensioni diverse in un ordine fisso ne rese inessenziale la grandezza, la sola posizione essendo sufficiente per determinarne il valore. Le differenze di dimensioni, divenute inutili, andarono lentamente scomparendo nel corso dei secoli, dando origine al sistema posizionale (salvo le ambiguità dovute all'assenza dello zero) senza che nessuno lo "inventasse". Cfr. [Neugebauer, ESA], pp. 34-35.

Un esempio dell'importanza data in epoca ellenistica al progresso tecnologico è fornito dalle *Sette meraviglie del mondo*. Poiché il Faro di Alessandria e il Colosso di Rodi sono due di tali *meraviglie*, l'elenco canonico risale evidentemente a una data posteriore alla costruzione del Faro (circa 280 a.C.) e antecedente alla distruzione del Colosso, avvenuta per il terremoto del 226 a.C. Siamo in pieno "secolo d'oro" della rivoluzione scientifica e, poiché la fortuna conservata nei secoli ne prova la popolarità, questa selezione delle opere più notevoli realizzate dall'uomo nella sua storia fornisce un'interessante testimonianza sulle idee dominanti dell'epoca. Le *Sette meraviglie* sono una sintesi dei tre principali elementi della cultura ellenistica: le tradizioni degli antichi imperi (presenti con due *meraviglie*: la grande piramide e i giardini pensili di Babilonia), la Grecia classica (presente con tre opere: la statua di Zeus ad Olimpia, il tempio di Artemide a Efeso e il Mausoleo di Alicarnasso) e le due opere che rappresentavano "il presente": il Faro e il Colosso. Si tratta di due prodotti della nuova tecnologia. Era la capacità di fondere bronzi colossali o di mandare luce a decine di chilometri di distanza che, agli occhi dei Greci del III secolo a.C., rendeva le proprie realizzazioni degne del confronto con i migliori prodotti del passato.

Con il progresso tecnologico consapevole nasce l'idea di progresso. La parola classica per indicare l' *incremento delle conoscenze*, ἐπίδοσις (*accrescimento*), è sostituita dalla parola προκοπή, *farsi strada*, della quale il termine attuale *progresso* è la traduzione letterale attraverso il latino.[4]

La nuova cultura scientifica trasforma molti aspetti della vita quotidiana. L'importanza data, in tutti i campi, all'elaborazione di conoscenze teoriche specifiche ha una chiara testimonianza nel fiorire della trattatistica, che è strettamente connesso al sorgere delle specializzazioni professionali. In molti campi il lavoro è compiuto o diretto da specialisti che si basano su conoscenze collegate allo sviluppo scientifico: è questo il caso di medici, ingegneri, tecnici della flotta e dell'esercito, ma anche di molte altre attività; si moltiplicano, ad esempio, non solo i trattati di agronomia o di apicultura,[5] ma anche quelli di pesca,[6] di

[4] Questa trasformazione linguistica è stata sottolineata in [Edelstein]. Naturalmente l'origine del termine non implica che il concetto moderno di progresso coincida con quello ellenistico. Per un'analisi storico-critica delle moderne concezioni di un progresso automatico e predeterminato (che invita più alla passività che al "farsi strada") cfr. [Popper PH] e [Popper OSE].

[5] Cfr. sopra, p. 189.

[6] Alcuni autori di trattati sulla pesca sono citati da Ateneo (*Deipnosophistae*, I, 13b-c). L'unico esempio pervenutoci è quello di Oppiano di Anazarbo.

veterinaria[7] o di profumeria.[8]

Un frammento di Crisippo illustra bene il nuovo concetto di progresso. Aristotele, analizzando nelle *Categoriae* la contrapposizione tra privazione e possesso di facoltà naturali, esemplificata con il caso di vista e cecità, aveva affermato che sono possibili solo le trasformazioni dal possesso alla privazione e non quelle inverse, giacché, ad esempio, un vedente può perdere la vista ma un cieco non può riacquistarla.[9] Crisippo osserva che Aristotele è smentito da coloro che riacquistano la vista con un'operazione di rimozione delle cataratte.[10] La critica di Crisippo era di grande importanza. Aristotele, credendo di vivere in un mondo sostanzialmente statico (come probabilmente avevano creduto tutti gli uomini che lo avevano preceduto), aveva considerato impossibili tutti gli eventi mai accaduti. Crisippo vedeva invece realizzarsi tante cose per la prima volta: non solo la pneumatica e la meccanica permettevano di costruire macchine che ottenevano risultati che Aristotele aveva considerato impossibili, ma addirittura i medici potevano ridare la vista ai ciechi.[11] Era quindi necessario riesaminare lo stesso concetto di "impossibilità", negando la validità dei giudizi di impossibilità formulati su base empirica.

Quello appena visto è un esempio delle interazioni tra filosofia e scienza medica, che sembrano generali e feconde in ambedue i sensi. Abbiamo già notato gli interessi epistemologici di Erofilo. D'altra parte la teoria della conoscenza di Crisippo,[12] e in particolare la sua teoria della percezione (κατάληψις[13]), dalle testimonianze rimaste appare chiaramente connessa alle nuove conoscenze sul sistema nervoso. È particolarmente interessante l'idea di Crisippo che la percezione non

[7] Un cenno bibliografico è in [Rostovzev SESME], vol. III, p.174, n. 61.

[8] Già Teofrasto aveva scritto un trattato *De odoribus*. In seguito ve ne furono diversi altri. Anche un medico della scuola di Erofilo, Apollonio Mys, scrisse un'opera *Sui profumi*, un brano della quale è riferito da Ateneo (*Deipnosophistae*, XV, 688e – 689b). Ateneo cita anche l'opera sui profumi di Filonide (*Deipnosophistae*, XV, 691f)

[9] Aristotele, *Categoriae*, 10, 13a, 35-36.

[10] L'affermazione di Crisippo è riferita in Simplicio, *In Arist. cat.*, ([CAG], vol.VIII), 401, 7 sgg.

[11] È ben noto che operazioni di rimozione delle cataratte furono effettuate da Demostene Filalete, il membro della scuola di Erofilo, vissuto nel I secolo d.C., del quale abbiamo parlato a p. 169; il frammento di Crisippo mostra che questo tipo di operazioni risaliva in realtà al III secolo a.C. Von Staden, pur non prendendo in considerazione il passo di Simplicio, aveva notato che il documentato interesse di Erofilo per le cataratte poteva suggerire la congettura che tali operazioni risalissero a lui. Cfr. [von Staden], pp. 574-576, 583-584.

[12] Le fonti rimasteci su Crisippo sono raccolte nel secondo volume di [SVF]. Cfr. anche [Gould], pp. 48-65, ed il già citato [Solmsen].

[13] Il nostro uso del termine *percezione* deriva dalla scelta di Cicerone di tradurre il termine κατάληψις di Crisippo con il latino *perceptio*.

consista solo nella modifica dello stato della *psiche* (sostanzialmente identificata con il sistema nervoso) provocata dai messaggi provenienti dagli organi di senso, ma soprattutto nel successivo eventuale atto di *assenso* (συγκατάθεσις). Il riconoscimento della funzione attiva del soggetto nella percezione (che sarà recuperato solo dopo molti secoli) ebbe probabilmente importanti conseguenze non solo in psicologia, ma anche, tra l'altro, in estetica. [14]

Le idee accennate in questo paragrafo non sono altro che aspetti della stessa rivoluzione intellettuale descritta nei capitoli precedenti. La novità essenziale della rivoluzione scientifica consiste nel fatto che l'uomo si rende conto, per la prima volta, di poter creare consapevolmente le proprie categorie culturali. È questo il fondamento comune di tutte le rivoluzioni concettuali che abbiamo già osservato nella nascita della scienza: il superamento della filosofia naturale grazie al metodo sperimentale (o "progettuale") di Ctesibio e di Archimede; il passaggio dalla concezione platonica a quella costruttivista in matematica; la nuova creazione di terminologie convenzionali nelle scienze empiriche. [15]

Anche le idee politiche e religiose sono influenzate dal nuovo clima ideologico. Nel pensiero politico si afferma l'idea, di origine sofistica, che il diritto e lo Stato derivino da un accordo tra gli uomini, fondato sull'utilità reciproca. [16] Evemero tenta una spiegazione razionalista delle religioni, sostenendo che all'origine dei culti degli dei vi fosse la divinizzazione di uomini eccezionali. [17] È ben più interessante che nell'Alessandria dei primi Tolomei sembri avvenire realmente l'unica creazione consapevole di una divinità di cui abbiamo notizia; sembra infatti

[14] Se ne può trovare un'eco in un bel brano di Filostrato sulla parte attiva dell'osservatore dell'opera d'arte (*Vita di Apollonio di Tiana*, II, xxii).

[15] Bruno Snell ha magistralmente descritto il processo di crescente acquisizione di consapevolezza nella cultura greca dall'epoca arcaica a quella classica ([Snell]). Credo però che sia a Snell che agli umanisti successivi sia sfuggita l'importanza del salto culturale successivo, che ha portato alla nascita della "scienza esatta". Cfr., ad es., [Snell], pp. 332-333, dove l'incapacità della "scienza dei Greci" di fondare una teoria del moto viene dedotta da un'analisi del pensiero di Zenone di Elea e di Aristotele.

[16] Questa idea, che ritornerà solo nel XVIII secolo, è chiara nelle *Massime capitali* di Epicuro (cfr. in particolare le massime XXXIII, XXXVI, XXXVII, XXXVIII). Per i precedenti nella sofistica si può ricordare l'idea del sofista Licofrone, riferita da Aristotele, che la legge sia una convenzione atta a garantire i rapporti tra gli uomini (Aristotele, *Politica*, III, 1280b). Cfr. [Popper OSE], vol. I, pp. 114-118.

[17] Anche le spiegazioni razionaliste dell'origine delle religioni, che saranno riecheggiate da Lucrezio, risalgono all'antica sofistica. Particolarmente notevole, a questo proposito, è un frammento di Crizia riferito da Sesto Empirico (*Adversus Dogmaticos*, III, 54).

che la personalità del dio Serapide sia stata creata da Tolomeo I Sotèr e dai suoi consiglieri.[18]

7.2. *L'urbanistica*

L'influenza della rivoluzione scientifica sulla vita civile è particolarmente evidente nelle modifiche che si hanno nel primo periodo ellenistico nelle strutture urbane. Il caso meglio conosciuto è Alessandria, metropoli cosmopolita che era divenuta in breve il centro più popoloso del mondo; abitata soprattutto da Greci, Egiziani ed Ebrei, vi si potevano incontrare immigrati provenienti da tutto il mondo conosciuto; tra i suoi nuclei etnici Dione di Prusa elenca Siriani, Persiani, Romani, Libici, Cilici, Etiopi, Arabi, Battriani, Sciti e Indiani.[19]

Le due strade maggiori, larghe più di 30 metri, erano costeggiate da portici illuminati da fanali che rimanevano accesi tutta la notte. Una rete sotterranea di canali distribuiva l'acqua proveniente dal Nilo, dopo averla resa potabile con il deposito dei materiali in sospensione, alle case private.[20]

Nella città vi erano parchi, teatri, stadi, palestre, il grande ippodromo e templi di varie religioni. L'edificio più splendido era però, secondo Strabone, il ginnasio.[21] Sembra che all'epoca della conquista araba vi fossero 400 tra teatri e altri luoghi pubblici di divertimento e 4000 bagni pubblici (cioè piccole terme).[22] Al centro della città (che era così affollata che una legge del III secolo a.C. imponeva distanze minime di pochi piedi tra gli edifici[23]) vi erano i boschetti sacri e il Paneum, cioè una collina artificiale conica dalla cui sommità si poteva

[18] Cfr. [Fraser], vol. I, pp. 246-259. Fraser afferma che "l'operazione di creare una nuova divinità, per quanto ci possa sembrare bizzarra, probabilmente non apparve così all'epoca".

[19] Dione di Prusa, *Orazioni*, 32.40.

[20] Cfr. ps.Cesare, *De bello alexandrino*, 5, dove si confronta l'acqua insalubre del Nilo, bevuta da coloro che non vivevano in case servite dalla rete idrica, con l'acqua che arrivava attraverso la rete dei canali, resa limpida dal deposito delle impurità. Bacini di sedimentazione costruiti a questo scopo sono documentati in diversi siti ellenistici; cfr., ad es., [Tölle-Kastenbein].

[21] La lunga descrizione di Strabone (*Geografia*, XVII, i, 6-10), che visitò Alessandria all'inizio della dominazione romana, è la nostra principale fonte sull' Alessandria ellenistica.

[22] Queste cifre erano in una lettera inviata dall'emiro Amr ibn al-'Āṣ, conquistatore di Alessandria, al califfo Omar. La lettera è riportata negli *Annali* di Eutichio (patriarca di Alessandria del X secolo); il brano con le cifre riferite è in [Canfora], p.92. Una cronaca del XII secolo, che si riferisce forse al IV secolo, parla invece di 1561 edifici termali, 845 taverne e 2478 templi (cfr. [Bowman], p. 232).

[23] P. Hal. I, 84 sgg.

ammirare il panorama. Il Faro era all'estremità di una strada sopraelevata che correva sulla diga che, unendo l'isoletta omonima alla terraferma, separava i due porti principali.

Parlando delle città ellenistiche, Poëte scrive:

> la stessa città sembra preannunciare la città moderna quando si presenta a noi con la sua moltitudine di edifici, con la sua popolazione numerosa, con le sue enormi ricchezze, con le fruttuose applicazioni al benessere comune dei ritrovati di una tecnica progredita [...] Per la prima volta vediamo la città nel vero senso del termine, con la sua vasta distesa di fabbricati, con la sua animazione, con la mole imponente dei suoi monumenti e degli edifici, con la comodità per la vita materiale e spirituale, col lusso fastoso e con la miseria nera, con i suoi divertimenti e i suoi vizi, con le propaggini dei sobborghi. Un alito di modernità sembra spirare fino a noi da questo mondo lontano: abbiamo l'impressione che non ci sentiremmo eccessivamente fuori del nostro ambiente in città come Antiochia o Alessandria. [24]

L'influenza della scienza sulla struttura urbana non consiste solo nell'uso della tecnologia scientifica per la realizzazione di alcune opere, come la rete di distribuzione dell'acqua o il Faro, o nella destinazione scientifica di altre, come il Museo o il giardino zoologico. Ciò che più conta è che la rivoluzione scientifica cambia l'idea stessa di città. La città classica era concepita come un organismo le cui dimensioni naturali erano fisse e in cui le varie parti erano in un naturale equilibrio. [25] Si rimediava alla sovrappopolazione con pratiche limitative delle nascite e con la fondazione di colonie. Ora invece lo sviluppo urbano viene razionalizzato e guidato, invece che impedito. Martin scrive:

> [La città ellenistica] non è più unicamente la città dei cittadini, il quadro armonioso in cui si sviluppa e si esercita l'attività politica: diventa città di popolamento, centro di affari, ove le attività artigianali e commerciali prevalgono sugli aspetti politici [...] Il fenomeno di urbanizzazione moderna ha le sue radici e i suoi inizi nell'urbanizzazione del mondo ellenistico. [26]

In epoca ellenistica la città non è più, quindi, un centro politico che vive della campagna circostante, come era stata nella Grecia classica (e come sarà di nuovo in epoca romana) ma, come la città moderna, è un centro di attività economica, che si sviluppa attraendo manodopera. Questa trasformazione (che

[24] [Poëte], p. 306 e p. 368.
[25] Cfr., ad es., Aristotele, *Politica*, VII, 1326a-b.
[26] [Martin], p. 573.

agli occhi degli studiosi contemporanei come Martin distrugge un quadro "armonioso") è difficilmente spiegabile senza una trasformazione dei metodi di produzione e fornisce quindi un'importante conferma alle tesi già esposte.

I nuovi centri sono in un equilibrio dinamico, che prevede e regola uno sviluppo indefinito. L'esistenza di una struttura aperta, indefinitamente proseguibile, fa associare al Benevolo le città ellenistiche alle città americane del Settecento e dell'Ottocento.[27] Altri aspetti della società ellenistica, e in particolare alessandrina, possono ricordare l'America moderna: una metropoli cosmopolita che grazie a un imponente sviluppo economico diviene rapidamente la maggiore del mondo; la conquista all'agricoltura di tanti terreni vergini; l'interesse per la tecnologia; il gusto del colossale; il diffondersi dell'industria culturale; il rapporto dei Greci emigrati con la Grecia, che può ricordare quello degli Americani con l'Europa.

Tra le tante differenze tra le due diverse situazioni storiche si può sottolineare il rapporto completamente diverso con gli indigeni: mentre i moderni nordamericani si scontrarono con tribù di cacciatori nomadi, i Greci emigrati in Egitto e in Mesopotamia vennero a contatto con le più antiche civiltà storiche. La superiorità sull'elemento indigeno non era assicurata dalla tecnologia, in cui anzi, come abbiamo visto, i Greci erano stati inizialmente inferiori, ma dagli strumenti culturali. Questa fu probabilmente una delle cause della grande attenzione dei Greci degli stati ellenistici verso la cultura e le istituzioni educative.

7.3. *La psicoanalisi*

Sarebbe molto interessante ricostruire il perduto pensiero ellenistico sull'analisi della "psiche". Qui accenneremo solo a un argomento particolare, peraltro importante: l'analisi dei sogni.

Un'opera su questo argomento che dal Rinascimento in poi ha sempre goduto di popolarità è il libro di Artemidoro di Daldi *Dell'interpretazione dei sogni* (Ὀνειροκριτικά), della seconda metà del II secolo d.C. L'opera di Artemidoro è stata pubblicata in Italia con un'introduzione dello psicoanalista Cesare Musatti. Lasciamo che sia Musatti a dare un'idea del contenuto di quest'opera in relazione alla psicoanalisi moderna. Musatti innanzitutto precisa la profonda differenza tra il quadro concettuale di Artemidoro e quello moderno:

[27] [Benevolo], p. 37.

Artemidoro accoglie il pensiero comunemente diffuso nel mondo antico, e poi perdurato fino ai tempi moderni, di un valore premonitore del sogno [...]
Freud sostiene la tesi generale del sogno realizzazione allucinatoria di un desiderio [...]
Il sogno può contenere anche per Freud un pronostico [...] Certo si tratta di un futuro che verrà fabbricato dall'autore del sogno, e non di fatti che si sviluppino fuori di lui e nei quali egli ignaro debba incappare. Per Artemidoro il futuro da rintracciare nei sogni è questo secondo; per Freud può essere soltanto un futuro costruito dallo stesso soggetto.[28]

Su questioni più tecniche Musatti trova però molti punti in comune tra Artemidoro e Freud. Ad esempio, parlando della distinzione di Artemidoro tra due tipi di sogno, l'ὄνειρος e l'ἐνύπνιον, Musatti scrive:

Si è tentati di considerare queste immagini (l'ἐνύπνιον di Artemidoro) affini, se non corrispondenti, a quelle che modernamente vengono indicate come ipnagogiche.[29]

Artemidoro suddivide i "veri sogni (ὄνειροι)" in "sogni contemplativi (θεωρηματικοὶ ὄνειροι)" e "sogni allegorici (ἀλληγορικοὶ ὄνειροι)". Musatti commenta:

Dei primi Artemidoro dice che si realizzano subito senza ritardo alcuno, mentre per gli allegorici la realizzazione si avrebbe soltanto dopo alquanto tempo. Questo della scadenza immediata prevista per i θεωρηματικοὶ ὄνειροι ha uno strano riscontro con quanto dice Freud dei "resti diurni" (immagini corrispondenti ad elementi già realmente vissuti durante la vita vigile ed inseriti senza trasformazione nei sogni): si presenterebbero nei sogni non oltre le quarantotto ore successive. [...]
[Tra i sogni allegorici] un certo interesse presenta la categoria dei κοσμικοὶ ὄνειροι (sogni cosmici). Si presentano abbastanza spesso anche nella odierna pratica analitica, e vengono indicati pure da noi come sogni cosmici [...]
Ma consideriamo nel loro insieme gli ἀλληγορικοὶ ὄνειροι, quelli cioè in cui le cose, anzi che con le immagini proprie, vengono rappresentate con altre immagini che le significano. "Quegli che ama una donna, non vedrà la donna amata, ma un cavallo, o specchio, o nave, o il mare, o animale femina, o habito di donna, o altra cosa che donna significa."[30] È il principio del simbolismo onirico, che anche la concezione freudiana ha accolto [...] Diciamo subito intanto, per la frase di Artemidoro, che i simboli enumerati per la

[28] [Musatti], pp. 7, 10, 11, 12.
[29] [Musatti], p. 9.
[30] Musatti cita Artemidoro nella traduzione cinquecentesca usata nel volume da lui introdotto.

donna sono, per così dire, tutti corretti (e cioè esatti) dal punto di vista dell'esperienza psicoanalitica [...][31]

Musatti trova altre corrispondenze tra Artemidoro e la psicoanalisi moderna. Un'ultima citazione può sintetizzare il suo pensiero:

Certo è affascinante ritrovare in questo autore di altri tempi, che pure dà al sogno un significato del tutto diverso, e per noi inaccettabile, una dimestichezza con un tipo di pensiero che la psicologia scientifica solo a gran fatica è riuscita nell'ultimo secolo a svelare.[32]

Notiamo che per Musatti Artemidoro non è un rappresentante del tardo ellenismo, ma semplicemente un autore "di altri tempi". Musatti è colpito da una apparente contraddizione tra la presenza nel pensiero di Artemidoro di tanti elementi della moderna psicologia scientifica e la sua fiducia nel potere divinatorio dei sogni. L'apparente contraddizione può forse essere spiegata inquadrando storicamente il pensiero esaminato: si tratta di quello stesso tardo ellenismo cui appartengono Galeno, Tolomeo ed Erone. Gli elementi culturali di origine indigena, spesso magici, rappresentati ad esempio in Tolomeo dal suo interesse per l'astrologia, contaminano sempre più le teorie scientifiche. I risultati scientifici acquisiti nei secoli precedenti vengono usati a scopi individuali ed immediatamente pratici. Abbiamo visto come Galeno, pur usando conoscenze anatomiche e fisiologiche della scuola di Erofilo (tra l'altro per una straordinaria carriera personale), non avesse più la capacità di comprenderne pienamente la metodologia; abbiamo visto Erone usare elementi della tecnologia alessandrina per meravigliosi giocattoli. Si può sospettare che, analogamente, Artemidoro usi a scopi divinatori residui di una antica "teoria scientifica dei sogni". In realtà non è difficile trovare l'origine di una tale teoria; conosciamo già il primo autore cui è attribuita: Erofilo di Calcedonia. Nella pseudogalenica *De historia philosopha* è infatti scritto:

Erofilo dice che i sogni "mandati da un dio"[33] si hanno necessariamente, i naturali invece si presentano quando la psiche forma le immagini di ciò che è a proprio vantaggio e di ciò che certamente accadrà; i sogni composti si formano poi spontaneamente, al so-

[31] [Musatti], pp. 14 – 15.
[32] [Musatti], p. 16.
[33] Il termine tradotto "mandato da un dio" è l'unica parola composta θεόπεμπτος che significa letteralmente "mandato da un dio", ma può anche essere usato semplicemente per "straordinario". L'uso di questa parola da parte dell'anonimo autore del passo non implica quindi necessariamente che Erofilo pensasse a una origine divina di questo tipo di sogni.

praggiungere delle immagini, ogni volta che sogniamo ciò che desideriamo, come accade agli uomini innamorati quando nei loro sogni fanno l'amore con le donne che amano.[34]

In Erofilo è quindi chiaro il rapporto sogno-futuro dovuto alla conoscenza di ciò che dovrà necessariamente accadere, l'importanza dei sogni sessuali e il rapporto sogno-desiderio. Purtroppo non abbiamo gli scritti di Erofilo sull'argomento, ma conoscendone il livello intellettuale e sapendo, tra l'altro, che può essere considerato il fondatore della psichiatria, vi sono pochi dubbi sul fatto che il contenuto dovesse essere molto interessante. La teoria di Erofilo fu ripresa e modificata dagli Stoici e influenzò la letteratura cristiana dei primi secoli, in cui però i sogni sessuali furono sostituiti da *sogni demoniaci.*[35] Un frammento di Posidonio riferito da Cicerone testimonia uno stadio intermedio tra Erofilo e Artemidoro; vi si riferisce infatti una classificazione stoica dei sogni che è ancora reminiscente di quella di Erofilo, ma è ormai inserita nel contesto della divinazione.[36]

Gli elementi di psicologia scientifica dell'opera di Artemidoro sembrano quindi provenire da una antica e nobile tradizione. È stato però proprio l'uso della teoria a scopo divinatorio, che fa sorridere i moderni scienziati, che ha permesso all'opera di Artemidoro di giungere fino a noi, salvata dagli stessi nostri antenati cui dobbiamo la scomparsa di tutte le opere di Erofilo.[37]

A questo punto si può pensare che il lontano casuale precursore di Freud sia in realtà non Artemidoro, ma Erofilo e la sua scuola. Ma c'è di più. Nell' *Interpretazione dei sogni* Freud scrive:

Sono ben lontano dal cercare di sostenere che sono il primo autore ad avere l'idea di far derivare i sogni dai desideri [...] Coloro che attribuiscono una qualche importanza a queste anticipazioni, posso-

[34] Pseudo-Galeno, *De historia philosopha*, 106 ([DG], 640 = test. 226c [von Staden]). Erofilo distingue nei sogni due elementi, entrambi presenti nei sogni composti, dei quali i sogni erotici sono un esempio. O si pensa che Erofilo considerasse necessario l'intervento divino in tutti i sogni erotici, oppure si deve credere che nessuno dei due elementi fosse per Erofilo di origine divina. Nel secondo caso Erofilo potrebbe aver voluto semplicemente distinguere gli elementi spiegabili come frutto della "naturale" attività psichica (volta alla ricerca del proprio vantaggio o a trarre conseguenze necessarie) dagli elementi "straordinari" in quanto non spiegabili in questo modo.

[35] Cfr. [von Staden], p. 310.

[36] Cicerone, *De divinatione*, I.64; cfr. [von Staden], p. 308. Si può sospettare che la terminologia usata nella citazione pseudo-galenica che ci ha tramandato la classificazione dei sogni di Erofilo (che è molto più tarda di Cicerone) sia stata influenzata anch'essa dalle opere successive.

[37] E anche di opere successive ad Artemidoro probabilmente più "scientifiche". Ad esempio anche il matematico Pappo aveva scritto degli Ὀνειροκριτικά, come sappiamo dalla Suda (s.v. *Pappo*).

no risalire all'antichità classica e trovare Erofilo, il medico che visse sotto il primo Tolomeo. Secondo Büchsenschütz, egli distingueva tre tipi di sogni: quelli [...] [38]

Freud continua riportando il passo dello pseudo-Galeno che già conosciamo; nel capitolo precedente aveva scritto:

> Il mondo profano ha cercato da tempi antichissimi di "interpretare" i sogni, e nei suoi tentativi si è servito di due metodi essenzialmente diversi.
> Il primo di questi procedimenti [...] è l'interpretazione simbolica dei sogni [...] Il secondo dei due metodi popolari per l'interpretazione dei sogni [...] si potrebbe chiamare metodo "cifrato" [...] Un'interessante variante al processo di decifrazione [...] si trova nel libro sull'interpretazione dei sogni di Artemidoro di Daldi [...]
> Indubbiamente nessuno dei due procedimenti popolari può essere impiegato per una trattazione scientifica dell'argomento [...] Perciò ci si potrebbe sentire tentati di dichiararsi d'accordo con i filosofi e gli psichiatri che cancellano il problema dell'interpretazione dei sogni come se fosse un compito fantasioso.
> Ma mi sono dovuto ricredere. Sono arrivato a rendermi conto che qui ancora una volta abbiamo uno di quei casi non rari in cui una antica credenza popolare tenacemente conservata sembra più vicina alla verità che non il giudizio scientifico vigente oggi. [39]

Freud, che cita spesso Artemidoro, afferma tra l'altro:

> Della letteratura che si è occupata dei sogni ci è rimasta fortunatamente l'opera principale, il libro di Artemidoro di Daldi. [40]

La moderna teoria psicoanalitica dei sogni è nata quindi, secondo l'autorevole testimonianza di Freud, partendo dagli elementi "vicini alla verità" riferiti da Artemidoro di Daldi (il cui libro Freud doveva aver studiato con cura, giudicandolo l'opera principale sull'argomento) e ponendo alla loro base l'"anticipazione" di Erofilo, cui correttamente (anche se forse inconsapevolmente [41]) Freud attribuisce la paternità della teoria dei sogni originati dai desideri. Se si è così potuta ricostruire almeno una

[38] S. Freud, *Die Traumdeutung*, 1900. Il passo è in una nota posta a conclusione del terzo capitolo (*Il sogno come soddisfazione di un desiderio*).

[39] S. Freud, *Die Traumdeutung*, cap. 2.

[40] S. Freud, *Vorlesungen zur Einführung in die Psychoanalyse*, 1915-1917; lezione quinta. Non si capisce se l'affermazione di Freud sia basata su una aprioristica fede nella fortuna o sulla convinzione dell'insuperabilità di Artemidoro.

[41] Il tono scherzoso con cui Freud cita Erofilo solo per "coloro che attribuiscono una qualche importanza a queste anticipazioni" fa pensare che anche in lui agisca la solita "rimozione freudiana" che fa apparire buffa l'idea di essere anticipato da un autore ellenistico.

parte del pensiero della scuola di Erofilo, non è stupefacente che Musatti trovi tanti "strani riscontri" tra Artemidoro e Freud, né che usino gli stessi termini, come nei casi dei sogni cosmici e delle immagini ipnagogiche,[42] né che tutti i simboli enumerati da Artemidoro siano benevolmente approvati come "esatti" dai lontani eredi del suo pensiero.

Resta da capire perché mai, usando le parole di Musatti, la psicologia scientifica nell'ultimo secolo sia riuscita a svelare "solo a gran fatica" il "tipo di pensiero" con cui Artemidoro aveva "dimestichezza". Si potrebbe sospettare che si sia trattato della fatica di tradurre le idee in un linguaggio "scientifico", secondo i canoni correnti. Se però nel caso della trigonometria, come abbiamo visto, era bastato dividere la corda per due per rendere la teoria irriconoscibile agli occhi di generazioni di storici della scienza,[43] non dovrebbe essersi trattato di un lavoro troppo faticoso.

Abbiamo parlato solo dei sogni, ma in Artemidoro vi sono interessanti accenni anche ad altri elementi della psicoanalisi. Ad esempio Musatti scrive:

> Per quanto riguarda il sogno di un incesto fra figlio e madre, Artemidoro ne parla come se conoscesse e condividesse le idee formulate da Freud sul complesso edipico.[44]

7.4. *La logica proposizionale*

Aristotele aveva dedicato molta attenzione alla logica, analizzando in particolare i sillogismi. Nella sua analisi, mentre i termini delle proposizioni erano stati sostituiti con variabili, la forma della proposizione era ogni volta fissata. Aristotele aveva potuto così considerare solo un numero finito di possibili forme di sillogismo. Inoltre la validità dei sillogismi non era in alcun modo giustificata se non in base all'evidenza degli esempi. Aristotele aveva quindi descritto l'uso della logica, ma non ne aveva formulato una "teoria".

I primi passi verso una teoria scientifica della logica sembrano quelli, intorno al 300 a.C., di Diodoro Crono e Filone il Dialettico, che in particolare definì la proposizione condizionale *se p allora q* come *non (p e non q)*.[45]

[42] Osserviamo che la *tentazione* di Musatti di considerare queste immagini affini al concetto di Artemidoro poteva veniva, oltre che dalla corrispondenza dei significati, anche dall'etimo: il termine moderno "ipnagogico" è costruito infatti con la parola di Artemidoro.

[43] Cfr. sopra, pp. 76-78.

[44] [Musatti], p.17.

[45] Cfr. Sesto Empirico, *Adversus Dogmaticos*, II, 113; *Lineamenti del Pirronismo*, II, 110.

Anche se l'esigenza di Filone di definire il condizionale in termini di congiunzioni e negazioni sembra preludere alla dimostrazione di teoremi di logica, sulla base delle testimonianze rimaste è Crisippo ad apparire il fondatore della teoria scientifica della logica proposizionale. Crisippo rappresentò infatti le proposizioni con variabili e costruì una teoria dell'inferenza logica basata su cinque postulati.[46] Indicando con p e q proposizioni generiche, le cinque regole di inferenza assunte da Crisippo come "indimostrate" sono quelle che permettono di dedurre la terza proposizione dalle prime due nei casi seguenti:

1.	Se p allora q	p	q
2.	Se p allora q	non q	non p
3.	non (sia p che q)	p	non q
4.	p oppure[47] q	p	non q
5.	p oppure q	non p	q.

Dai cinque postulati si potevano dedurre come teoremi un numero illimitato di possibili schemi di inferenza. Nessuno dei teoremi logici di Crisippo ci è stato conservato. Tra le opere di Crisippo vi erano diversi libri dedicati all'analisi di antinomie e paradossi logici.

Nessuno storico della filosofia aveva apparentemente colto la sostanza del lavoro di Crisippo prima dello studio di Benson Mates, pubblicato nel 1953.[48] Per poter comprendere Crisippo bisognava che si sviluppasse la logica proposizionale moderna e anche che qualche studioso si dedicasse allo stesso tempo alla logica proposizionale e alla filosofia antica, discipline allora considerate lontane. Mates e altri sono stati però criticati per avere usato la logica proposizionale moderna per interpretare Crisippo. Lo storico della filosofia A. Long scrive:

> Alcuni studiosi hanno di recente argomentato che la logica moderna può difficilmente essere la chiave migliore per comprendere questa o qualunque altra teoria logica antica. Il dibattito continua.[49]

[46] I cinque postulati di Crisippo sono in Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VII, 79-81 e in Sesto Empirico, *Lineamenti del Pirronismo*, II, 157-158. Un altro brano di Sesto Empirico (*Adversus Dogmaticos*, II, 224-227) riporta solo i primi tre postulati ma dà più informazioni sui teoremi di logica.

[47] *Oppure* va inteso in senso esclusivo.

[48] [Mates]. Un altro libro molto interessante sulla logica antica (e i suoi rapporti con la logica moderna) è [Bocheński] (si tratta di un libro in parte basato sul lavoro di Mates, all'epoca ancora inedito).

[49] [Long], p. 187.

È importante, ai fini del nostro discorso, analizzare l'argomentazione riferita da Long. Essa si basa su una considerazione ragionevole e una assunzione implicita che viene spesso usata inconsapevolmente quando si riflette sul passato. La considerazione ragionevole è che difficilmente la chiave per capire un autore può venire da una cultura a lui lontana; questa non è altro che consapevolezza (peraltro di origine ellenistica) della relatività storica della cultura. Ciò che viene implicitamente assunto è un metodo per misurare la "distanza" tra due culture. Si parla infatti di "logica moderna" e di "qualunque altra teoria logica antica"; si assume cioè come metro per giudicare la distanza tra le culture anzitutto una bipartizione tra ciò che è *antico* e ciò che è *moderno*. Tante cose divengono più chiare se si riesce ad abbandonare questa opposizione antico-moderno che è radicata profondamente in noi sin dal Rinascimento. La distanza tra due culture non può infatti giudicarsi usando questa categoria, né misurarsi in secoli o in chilometri, ma solo individuando le cesure dovute a rivoluzioni culturali e seguendo i fili, spesso sottili, di influenze profonde.

La logica di Crisippo è molto diversa da una "qualunque altra teoria logica antica", in quanto è un prodotto della rivoluzione scientifica che stiamo cercando di descrivere. Si tratta infatti della trasposizione alla logica dello stesso schema concettuale usato negli *Elementi* di Euclide, che Crisippo aveva certo ben studiato,[50] e ciò rende la nuova teoria radicalmente diversa, ad esempio, dalla logica aristotelica. Se quindi si vuole trovare la chiave per comprendere Crisippo in una cultura a lui "vicina", si può provare cercandone una in cui sia essenziale lo stesso schema deduttivo euclideo.

Non avrebbe però senso cercare di assiomatizzare la logica, seguendo lo schema usato da Euclide, da parte di chi non riesce neppure a seguire il metodo di Euclide nel caso della matematica. Per applicare lo schema euclideo alla logica, fondando la logica proposizionale, come aveva fatto Crisippo, occorreva quindi prima recuperare completamente Euclide. Strumenti utili per la comprensione di Crisippo vanno quindi cercati negli ambienti matematici della fine del XIX secolo; con particolare riguardo alla scuola tedesca, cui dobbiamo il recupero di Euclide (grazie in particolare ai lavori di Weierstrass e Dedekind del 1872, dei quali abbiamo parlato a p. 64). Non stupisce quindi che i primi passi verso la moderna logica proposizionale (consistenti in par-

[50] Proclo, citando Gemino, riferisce che Crisippo aveva usato un teorema di Euclide (*Elementi*, I, prop. 35) per illustrare con un'analogia il ruolo delle idee; cfr. Proclo, *In primum Euclidis elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), p. 395, 13-18.

ticolare nel recupero della definizione di Filone del condizionale) siano stati compiuti nel 1879 dal matematico tedesco Gottlob Frege.[51]

7.5. *Gli studi filologici e linguistici*

La storia della letteratura e gli studi filologici nacquero nel primo periodo ellenistico e si svilupparono in particolare ad Alessandria (a opera soprattutto di Callimaco, Eratostene, Aristofane di Bisanzio e Aristarco di Samotracia) fino alla tragica interruzione del 145 a.C.[52]

La filologia moderna, non solo nella sua fase umanistica ma anche nei suoi sviluppi più tecnici risalenti al XVIII secolo, nacque dal recupero della filologia alessandrina. Un contributo importante venne, in particolare, dal rinnovamento della filologia omerica che si ebbe alla fine del XVIII secolo grazie al ritrovamento di antichi scolii all'Iliade, conservati in un codice veneziano, che riportavano vaste informazioni sulla critica testuale di Aristarco.[53]

La nascita della filologia e della storia della letteratura è stata spesso presentata come una prova della decadenza culturale ellenistica. Tali discipline sono state viste, cioè, come il frutto di quell'erudizione pedante dei tanto bistrattati dotti alessandrini, che si sostituisce alla fresca e robusta ispirazione dell'età classica. Questi giudizi, provenendo da filologi e storici della letteratura, possono forse fornire un indizio sull'origine del fenomeno di rimozione che abbiamo notato sin dal primo capitolo.

Abbiamo già visto come la rivoluzione scientifica avesse generato una nuova concezione linguistica: era infatti divenuta chiara la possibilità e l'utilità di arricchire consapevolmente il lessico creando terminologie nuove corrispondenti a nuove costruzioni concettuali. Questa nuova possibilità, che probabilmente fu anche all'origine del riconoscimento dell'evoluzione storica della lingua,[54] fu usata subito nei confronti della lingua

[51] Cfr. [Frege].

[52] Cfr. sopra, pp. 28, 91n (56). Anche Aristarco di Samotracia dovette lasciare Alessandria. Per la storia della filologia ellenistica cfr., ad esempio, [Pfeiffer].

[53] Gli scolii, contenuti in un codice del X secolo conservato a Venezia, furono pubblicati nel 1788. Sette anni dopo F. A. Wolf ripropose le antiche questioni alessandrine nei suoi famosi *Prolegomena ad Homerum*, fondando così la filologia omerica moderna.

[54] Mentre Aristotele ha ancora una concezione statica della lingua, Sesto Empirico sottolinea sia l'infinità dei possibili significati e significanti, sia l'evoluzione del lessico (*Adversus Mathematicos*, I, 82). Il secondo punto era stato ripreso anche da Orazio (*Ars Poetica*, 60 sgg.)

stessa. Si creò infatti la grammatica greca, individuando le parti del discorso, i cinque casi del nome e dell'aggettivo greco (nominativo, genitivo,...), i tempi del verbo e così via. Venne cioè formulata una teoria (nel senso delle scienze empiriche) con l'introduzione di una terminologia nuova e convenzionale per denotare i concetti propri della teoria stessa.[55] La più antica opera di grammatica sulla quale siamo bene informati, grazie a un compendio bizantino, è l' *Arte grammatica* di Dionisio Trace (del II secolo a.C.), che già usa la terminologia attuale. È però certo, dalle testimonianze rimasteci, che la grammatica greca non sia successiva al III secolo a.C.[56] ; se ne occuparono in particolare esponenti della scuola stoica, tra i quali lo stesso Crisippo[57]; i suoi principali risultati (quali le descrizioni della flessione del nome e della coniugazione del verbo) erano certamente già acquisiti nelle opere di Aristofane di Bisanzio, maestro di Dionisio Trace.[58]

Siamo bene informati sulla grammatica perché essa fu fatta propria dai Romani.[59] Sappiamo meno sulla semantica, che fu sviluppata nella scuola stoica in stretta connessione con la teoria della conoscenza e la logica. Le tarde citazioni rimaste non permettono di ricostruire i risultati ottenuti in questo campo, ma sono sufficienti per determinarne il livello. Long scrive:

> Uno degli aspetti più interessanti della teoria semantica stoica è la distinzione che essa traccia tra senso e riferimento. Questa distin-

[55] Un importante precedente degli studi grammaticali ellenistici è in Aristotele, *Poetica*, 56b-57a, dove però si distingue solo il nome dal verbo e la flessione (sia del nome che del verbo) è solo accennata genericamente e non descritta; del resto ciò non sarebbe stato possibile senza l'introduzione di una terminologia convenzionale, una possibilità che sembra estranea al pensiero di Aristotele.

[56] I rapporti con la grammatica sanscrita, in particolare a opera di Pāṇini, non sono chiari. La continuità tra teoria stoica della conoscenza, semantica stoica, elaborazione di terminologie convenzionali in altri campi e studi grammaticali ellenistici mi sembra però facciano escludere che la grammatica greca possa essere nata come mera trascrizione di una teoria importata dall'India.

[57] Due frammenti, uno di Diocle di Magnesia e uno di Galeno, riportano l'elenco di Crisippo delle cinque parti del discorso ([SVF],vol. II, 147 e 148). Nome proprio, verbo, congiunzione e articolo sono in ambedue i frammenti; Diocle aggiunge il nome comune e Galeno la preposizione. Uno stadio successivo degli studi grammaticali è testimoniato da Plutarco, che discutendo la funzione delle varie parti del discorso include tra queste anche l'avverbio e il pronome (*Platonicae quaestiones*, 1009B-1011E).

[58] Anche per gli studi linguistici ellenistici è utile [Pfeiffer]. Sulla grammatica, in particolare, cfr. pp. 318-319 e pp. 403 sgg.

[59] La grammatica latina nacque con Remmio Palemone che, all'epoca di Tiberio, adattò al latino l'opera di Dionisio Trace.

zione, che fu formulata per la prima volta in senso tecnico dal logico tedesco Gottlob Frege, si è rivelata estremamente feconda.[60]

Long illustra poi la distinzione stoica usando dei passi di Diogene Laerzio.[61] Dopo quanto abbiamo visto nel paragrafo precedente, non meraviglia troppo ritrovare Frege come primo moderno che riesce a recuperare anche le idee ellenistiche sulla semantica. Quel considerare solo la distinzione moderna "formulata in senso tecnico" ricorda però un po' osservazioni analoghe che abbiamo già sentito, ad esempio nel caso della trigonometria. Long, poco dopo il brano citato, conclude dicendo:

> Ma, per tornare a Frege, occorre non forzare troppo oltre l'accostamento della sua teoria del significato a quella degli Stoici. Gli Stoici non hanno alcun termine che corrisponda chiaramente all'uso fregeano di "Bedeutung", "riferimento". Il suo posto è preso, nello stoicismo, dai "corpi" (la cosa cui si fa riferimento) o dal "soggetto grammaticale".

Una pietra miliare della linguistica moderna è rappresentata dall'opera di Ferdinand de Saussure. In tempi più vicini a noi hanno avuto grande risonanza i contributi alla teoria del significato di Roland Barthes, fondatore della moderna semiologia. Vediamo come Barthes spiega le teorie del significato di Saussure e propria negli *Eléments de sémiologie*:

> Lo stesso Saussure ha evidenziato la natura psichica del significato chiamandolo "concetto": il significato della parola "bue" non è l'animale "bue", ma la sua immagine psichica. Queste discussioni rimangono però improntate di psicologismo; sarà forse preferibile seguire l'analisi degli Stoici, i quali distinguevano scrupolosamente la φαντασία λογική (la rappresentazione psichica), il τυγχανόν (la cosa reale) e il λεκτόν (il "dicibile"); il significato non è né la φαντασία, né il τυγχανόν, ma il λεκτόν; né atto di coscienza né realtà, esso può essere definito solo all'interno del processo di significazione, in modo quasi-tautologico: è quel "qualcosa" che colui che impiega il segno intende con esso. In questo modo si perviene appunto a una definizione puramente funzionale.[62]

Le concezioni linguistiche ellenistiche fatte proprie da Barthes sono un aspetto importante della rivoluzione scientifica.

[60] [Long], pp. 184-185.
[61] Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VII, 94-102.
[62] [Barthes], p. 40. Le principali fonti sulla semantica stoica sono anzitutto alcuni passi di Sesto Empirico e poi accenni di Stobeo, Diogene Laerzio ed altri. I termini usati da Barthes sono tutti spiegati in Sesto Empirico, *Adversus Dogmaticos*, II; in particolare la triplice distinzione stoica tra segno, significato e oggetto è introdotta in II, 11-12 e il concetto stoico di λεκτόν è illustrato in II, 70.

Nel III secolo a.C. appaiono in tutti i campi nuove costruzioni teoriche, basate sull'uso di concetti nuovi, consapevolmente creati e denotati con termini convenzionali. Il ridurre il significato delle parole al λεκτόν, cioè a "ciò che si vuole significare", intendendo quindi le parole come "segni" non di oggetti naturali ma di concetti liberamente elaborati e indipendenti dal potere evocativo (che pure è riconosciuto) delle parole usate per denotarli, nasce evidentemente dalla riflessione su queste costruzioni intellettuali. La semantica stoica non è altro, quindi, che un ulteriore aspetto di quella stessa rivoluzione di pensiero che aveva portato, tra l'altro, alla scienza sperimentale e alla teoria della percezione attiva di Crisippo.

È certamente vero, come dice Long, che non bisogna forzare troppo l'accostamento tra la semantica degli Stoici e quella di Frege, ma forse anche perché, a quanto appare dall'autorevole testimonianza di Barthes, all'epoca di Frege il recupero della semantica stoica era ancora lontano dall'essere completato.

7.6. *Arti figurative, letteratura e musica*

Le opere dell'arte figurativa ellenistica mostrano caratteristiche straordinarie di modernità, come è stato spesso notato. Come nell'Europa moderna (nell'Olanda del Seicento, ad esempio) la pittura prevale sulla scultura e i soggetti cambiano radicalmente rispetto al periodo precedente. Si sviluppano la ritrattistica privata, la paesaggistica e le nature morte. Nascono, tra l'altro, il *barocco*, il *naturalismo*, il *classicismo* e l' *impressionismo*, termini che non indicano stili antichi con vaghe analogie negli omonimi stili moderni, ma sembrano usati in modo appropriato.[63] La facilità con cui gli stili artistici ellenistici possono essere classificati con la terminologia moderna può apparire sorprendente. Riflettendo meglio, nel caso del barocco non stupisce troppo che tale termine possa essere usato senza forzature a riguardo di opere dal cui studio la nascita del barocco non è stata certo indipendente. Che gli artisti ellenistici siano riusciti a "prefigurare" anche gran parte dell'arte successiva?[64]

[63] Ad esempio Bianchi Bandinelli scrive che un mosaico rinvenuto a Palermo "presenta l'eco di una pittura tutta costruita senza linee di contorno e tutta affidata agli effetti di luce in modo, effettivamente, quasi impressionistico" ([Bianchi Bandinelli], p. 477).

[64] L'evoluzione degli stili moderni omonimi a quelli citati è avvenuta in secoli durante i quali un gran numero di opere di ispirazione ellenistica erano portate alla luce e studiate ed è avvenuta a opera di artisti che ponevano nello studio dell'arte antica il fondamento stesso della propria cultura.

Anche in letteratura si moltiplicarono stili e generi. Alcuni generi letterari mantennero l'antica terminologia, ma avevano ben poco in comune con gli omonimi generi classici. Gli epigrammi classici, ad esempio, erano iscrizioni scritte su commissione; l'epigramma ellenistico, del quale dobbiamo a Callimaco gli esemplari più raffinati, è una finta iscrizione; un prodotto culturale nato da esigenze sociali si trasforma così in un'occasione di libera e consapevole invenzione. Nascono la poesia bucolica, la "commedia borghese" e il più fortunato dei nuovi generi letterari: il romanzo.[65]

Vi è qualche rapporto tra la scienza e le nuove caratteristiche dell'arte e della letteratura? Una relazione è suggerita dalla contemporaneità sia della nascita che del recupero: le stesse caratteristiche dell'arte ritorneranno infatti in epoca moderna insieme al metodo scientifico.

La scienza fornisce certamente all'arte strumenti tecnici e concettuali, come abbiamo visto nel caso del rapporto tra ottica e pittura e come vedremo nel caso della musica. Vi sono inoltre evidenti relazioni tra forme dell'arte e struttura sociale. Molti aspetti dell'arte ellenistica sono dovuti all'esistenza, come nell'Europa moderna, di un ceto medio di lettori e acquirenti di opere d'arte e lo sviluppo scientifico-tecnologico non sembra indipendente dal formarsi di questa classe sociale.

Tra scienza e arte vi sono però anche relazioni più profonde. L'aspetto principale della rivoluzione scientifica consiste nel rendere consapevole la creazione di cultura. È questa consapevolezza che dà origine allo sperimentalismo artistico, che moltiplica gli stili e i generi. Allo stesso tempo l'interesse si sposta dalle categorie culturali "mitizzate", anche se in modi diversi, nelle età arcaica e classica, all'individuo, che di tali categorie culturali si riconosce il creatore, e alla sua vita concreta. Vengono così privilegiati i soggetti tratti dalla vita quotidiana, come in pittura i ritratti, i paesaggi e le nature morte[66] e nella commedia borghese ambienti e personaggi tratti dal mondo degli spettatori.

[65] L'origine ellenistica del romanzo è stata a lungo ignorata. Il romanzo in lingua greca è stato fatto risalire alla tarda età imperiale fino alla scoperta (a Ossirinco, nel 1945) di un papiro, risalente al I secolo a.C., contenente frammenti del *romanzo di Nino*. Attualmente molti pensano che l'origine del romanzo sia da collocarsi nel II secolo a.C.

[66] Particolarmente significative, a questo riguardo, sono le opere pittoriche il cui soggetto è la stessa bottega del pittore o quella di altri artigiani; quadri di questo tipo sono dovuti ad Antìfilo, attivo alla corte di Tolomeo I Sotèr (cfr., ad esempio, Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 114, 138) e a vari altri pittori, tra i quali Filisco e Pireico (Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 112, 143).

Il romanzo appare connesso sia alla nuova idea della produzione culturale come invenzione consapevole che alla nuova destinazione, individuale e privata, dell'opera.[67]

Nella Grecia classica con la parola μουσική si intendevano musica, canto e danza, concepiti come un'unità inscindibile. I nostri concetti di *musica* e di *musicista* risalgono al primo periodo ellenistico.[68] Allo stesso periodo (cioè alla seconda metà del IV secolo a.C.) risale la prima vera teoria musicale, a opera di Aristosseno di Taranto. S. Franchi, in un saggio sulla musica greca, scrive:

> Queste dottrine rappresentano ancora oggi la base per qualsiasi studio sui sistemi sonori e spesso ci meravigliano per la loro acutezza, come quando Aristosseno ed altri giungono a prefigurare quel temperamento equabile che fu conquistato solo alla fine del Seicento.[69]

Come abbiamo visto in tutti i casi esaminati, dalla semantica alla tecnologia navale, dalla viticultura alla teoria dei sogni, dalla logica proposizionale al raffinamento dei metalli, ogni specialista che, studiando il proprio settore, si imbatte nel periodo della rivoluzione scientifica constata, con immancabile *meraviglia*, che le conoscenze moderne erano state allora *prefigurate*. Il concetto della *prefigurazione* di teorie successive ricorda un po' la *premonizione* in cui credeva Artemidoro di Daldi. Essendo riusciti, nel caso dei sogni, a ricostruire la teoria scientifica di Erofilo, non si potrebbe cercare di fare lo stesso per la storia della cultura? Sostituire cioè alle *prefigurazioni* lo studio delle influenze del pensiero ellenistico sul pensiero moderno?

La principale innovazione ellenistica nel settore degli strumenti musicali fu l'introduzione del primo strumento a tastiera: l'organo idraulico,[70] che sembra essere anche il primo strumento musicale progettato scientificamente. L'invenzione è attribuita a Ctesibio di Alessandria[71] ed è chiaramente connessa alla nuova scienza della pneumatica da lui creata. Nell'organo di Ctesibio l'aria racchiusa in un serbatoio a tenuta stagna era spinta nelle canne immettendo acqua in un serbatoio. Resti di uno strumento di questo tipo, di età imperiale, con quattro registri di tredici canne, sono stati trovati ad Aquincum (l'attuale

[67] Per un'analisi dei rapporti tra le opere letterarie greche e i modi della loro fruizione cfr. [Gentili].

[68] Cfr., ad esempio, [Gentili Pretagostini].

[69] [Franchi], p. 624.

[70] Lo strumento è descritto in Vitruvio, *De architectura*, X, viii.

[71] In particolare da Ateneo (*Deipnosophistae*, IV, 174, b, d-e). Ateneo afferma anche esplicitamente che Aristosseno non conosceva ancora questo strumento (IV, 174 c).

Buda) e sono esposti nel locale museo. Gli organi medievali sono i diretti discendenti di quelli alessandrini, che si erano perpetuati attraverso gli organi imperiali e bizantini.[72]

La teoria musicale aveva strette relazioni con l'acustica, i cui sviluppi teorici sono poco noti[73]; quanto alle applicazioni, sappiamo, ad esempio, che i teatri erano attrezzati con camere acustiche che, oltre a produrre un effetto anti-eco, erano dotate di risonatori di bronzo che amplificavano una selezione di frequenze.[74]

Anche nel caso della musica gli studiosi moderni giudicano in genere severamente l'ellenismo, qualificando come manifestazioni di decadenza tutti gli elementi culturali fatti propri dalla civiltà moderna. Nella *Oxford History of Music*, ad esempio, è scritto:

> Le forme di musica rurale furono raccolte più tardi dagli studiosi alessandrini, più dalle fonti letterarie che dalla vita. Essi catalogarono oltre cinquanta tipi di danza generica o regionale, con innumerevoli canti d'amore dei pastori o canti di lavoro delle categorie più umili – i "canti pratici" dei filatori, dei mugnai, dei mietitori e dei portatori d'acqua all'opera. [...]
>
> Tuttavia è certo che i poeti raffinati erano sempre meno capaci di fare della musica, e i musicisti di scrivere dei versi ricercati. Quando l'unità classica della musica cominciò a sfaldarsi, alla "musica" (nel significato ristretto che il termine ha per noi) provvide un professionista scritturato per l'esecuzione.[75]

I moderni musicologi deprecano quindi la formazione, in epoca ellenistica, del concetto di musica che riconoscono come proprio. Anche l'interesse per la cultura musicale popolare è visto con sospetto dai moderni studiosi delle antiche fonti letterarie, che temono di imbattersi in loro lontani colleghi.

[72] Il primo organo medievale europeo fu infatti quello (idraulico) che il re dei Franchi Pipino il Breve ricevette in dono nel 757 dall'imperatore bizantino.

[73] Tra le conoscenze documentate in modo qualitativo vi sono osservazioni sulla velocità del suono (cfr., ad esempio, Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, V, 69), l'analogia tra le onde sonore sferiche che si propagano nell'aria e le onde piane sulla superficie dell'acqua (cfr., ad esempio, Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VII, 158), la relazione tra velocità delle vibrazioni e altezza del suono percepito (cfr., ad esempio, Plutarco, *Platonicae quaestiones*, 1006A-B). D'altra parte i risultati elementari tradizionalmente attribuiti a Pitagora dimostrano, se non altro, l'esistenza di sviluppi quantitativi.

[74] Cfr. Vitruvio, *De architectura*, V, v. Vitruvio accenna a questo proposito a una teoria quantitativa e osserva che i sistemi greci da lui descritti non erano entrati in uso a Roma. Nel corso di recenti lavori di restauro camere acustiche del tipo di quelle descritte da Vitruvio sono state trovate nel teatro di Scythopolis (nell'attuale Israele).

[75] [Henderson], pp. 436 e 445. Per la musica popolare e i canti di lavoro cfr. Ateneo, *Deipnosophistae*, XIV, 618e-620a.

8. Decadenza e fine della scienza

8.1. *La crisi della scienza ellenistica*

La scienza e, più in generale, la civiltà ellenistica, dopo essersi sviluppata in modo straordinario nel III secolo a.C., entrò in crisi nel corso del secolo successivo.

La ripresa degli studi avvenuta in epoca imperiale portò a un recupero di antiche conoscenze, ma non a nuove "teorie scientifiche"; lo stesso metodo scientifico fu anzi rifiutato. Il rifiuto dei concetti teorici, che abbiamo visto implicito in Galeno e vedremo esplicito in Plutarco, fu teorizzato a livello filosofico dagli scettici. La migliore esposizione rimasta è l'opera che Sesto Empirico, intorno al 200 d.C., scrisse *Contro i matematici* (Πρὸς μαθηματικούς).

Cosa si intendeva allora con *matematici* ? L'origine dell'uso ellenistico del termine *matematica* (ἡ μαθηματική, da μάθημα, *studio, oggetto di studio*) è così spiegata alla fine del III secolo d.C. da Anatolio:

> Perché la matematica è chiamata così?
> I Peripatetici, che dicono che la retorica, la poesia e la musica popolare possono essere praticate anche senza essere studiate, ma che nessuno può capire le cose che vengono chiamate con il nome matematica senza averle prima studiate, rispondono che per questa ragione la teoria di queste cose è detta matematica. [1]

La *matematica* è quindi concepita come un insieme di *teorie* che non possono essere comprese senza studio; sono quelle che

[1] [Heronis OO], vol. IV, 160.8-162.2. Vari brani di Anatolio sono stati pubblicati con le opere di Erone perché erano nella raccolta bizantina che ci ha conservato le *Definizioni di Erone*.

avevamo chiamato "teorie scientifiche". Il titolo dell'opera di Sesto Empirico potrebbe forse tradursi *Contro gli scienziati*. L'antica *matematica* aveva però un significato molto più esteso dell'attuale *scienza*: tra i *matematici* contro cui scrive Sesto Empirico include grammatici e teorici della musica. Alcuni enunciati di grammatica sono del resto chiamati *teoremi* (θεωρήματα).[2] Questa terminologia conferma la natura unitaria della rivoluzione scientifica. Sesto Empirico scrive, in generale, contro la possibilità di costruire modelli teorici. Le sue argomentazioni sono ben riassunte da alcuni passi dell'opera:

> se esiste qualche μάθημα, su quattro cose bisogna accordarsi: l'oggetto dell'insegnamento, chi insegna, chi apprende e il metodo di insegnamento. Ma, come mostreremo, non esistono né l'oggetto insegnato, né l'insegnante, né chi apprende, né il metodo di insegnamento; non vi è quindi alcun μάθημα.[3]

Ecco un argomento sull'inesistenza dell'oggetto dell'insegnamento:

> Poiché le cose o sono corporee o sono incorporee, gli oggetti dell'insegnamento, se sono qualcosa, debbono essere o corporei o incorporei [...] Ora gli oggetti corporei, soprattutto secondo gli Stoici, non possono essere insegnati; infatti ogni oggetto di insegnamento è un λεκτόν, ma un corpo non è un λεκτόν e quindi non può essere insegnato. [...][4]
> Né lo può essere l'incorporeo [...] giacché alcuni affermano che tali cose esistono, altri che non esistono, mentre altri ancora sospendono il giudizio [...][5]

I λεκτά (letteralmente i *dicibili*, ossia i *significati*[6]) che per gli Stoici erano il solo possibile oggetto di insegnamento sono evidentemente strumenti concettuali. In epoca imperiale, essendosi perduto il concetto di modello teorico, tali enti erano concepibili solo come oggetti reali; l'alternativa tra "enti corporei" ed "enti incorporei" diveniva così ineludibile. Alcuni di tali enti furono effettivamente materializzati, come vedremo nel caso delle sfere celesti di cristallo, che sostituirono le sfere di Eudosso di Cnido e gli epicicli di Apollonio di Perga. Ad altri, come agli enti della geometria, fu assegnata una realtà incorporea,[7] respingendo la geo-

[2] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, I, 133.
[3] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, I, 9.
[4] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, I, 19-20.
[5] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, I, 28.
[6] Per il significato di questo termine, cfr. sopra, pp. 217-218.
[7] Per un'enunciazione esplicita di questa posizione, cfr., ad esempio, Giamblico, *De communi mathematica scientia*, 28, 22-35.

metria nell'ambito di quella concezione platonica che Euclide aveva rifiutato.[8]

Quali furono le cause della crisi della scienza?

Molti sembrano aver condiviso l'opinione di C. Préaux, secondo la quale la causa di quella che ella chiama "stagnazione del pensiero scientifico nell'epoca ellenistica" sarebbe stata l'eccessiva autorità di Aristotele.[9]

Notiamo che Aristotele, per il quale il cervello aveva una funzione refrigerante, non poteva aver goduto di eccessiva autorità presso Erofilo e i suoi allievi, fondatori della neurofisiologia, né presso Archimede o Ctesibio, che avevano progettato macchine capaci di compiere operazioni di cui Aristotele aveva "dimostrato" l'impossibilità. Abbiamo visto un analogo superamento di Aristotele nella teoria eliocentrica di Aristarco e nelle concezioni matematiche, linguistiche e logiche, perfino nelle critiche al finalismo dell'allievo prediletto Teofrasto. La scienza, alla cui nascita Aristotele aveva contribuito, si era evidentemente sviluppata senza riguardo ad autorità di alcun tipo.

Nei secoli III e II a.C. la principale scuola filosofica, la Stoa, ha come propri avversari epicurei e scettici e non polemizza con Aristotele se non in modo marginale. L'"eccessiva autorità di Aristotele", che è stata spesso retrodatata, riguarda evidentemente epoche successive: può quindi essere forse un effetto ma certo non una causa della crisi della scienza.

Le guerre tra Romani e stati ellenistici iniziarono con la distruzione di Siracusa nel 212 a.C. ed è stato sottolineato come emblematico il fatto che i Romani avessero inaugurato la nuova politica verso l'ellenismo uccidendo Archimede.[10] Diverse città furono rase al suolo come Siracusa. In altri casi le intere popolazioni furono ridotte in schiavitù.[11] La fase decisiva delle guerre si concluse nel 146 a.C., anno in cui furono rase al suolo Cartagine e Corinto. L'anno successivo fu il re Tolomeo VIII a incaricarsi di eliminare la comunità greca di Alessandria.[12]

[8] Per la posizione di Euclide cfr. sopra, §2.8, e il prossimo §9.1.

[9] [Préaux SPSEH].

[10] Si legge sempre che Archimede fu ucciso per un tragico errore, trasgredendo gli ordini del comandante Marcello, che ne fu molto addolorato. Attribuire tanto rispetto per la scienza a un generale romano del III secolo a.C. può essere un anacronismo. Questa versione dei fatti, che risale in parte a Livio e fu ulteriormente abbellita da Plutarco, non ha alcun riscontro in Polibio, che probabilmente già all'epoca di Livio era l'unica fonte attendibile sul saccheggio di Siracusa.

[11] È ciò che accadde, ad esempio, ad Antikyra nel 211 a.C., a Oreos nel 208 a. C., a Dyme nel 207 a.C.

[12] Cfr. sopra, p. 28.

Non bisogna confondere i Romani del III o II secolo a.C. con la civiltà di Virgilio e di Orazio. La raffinata cultura di alcuni intellettuali romani fu resa possibile proprio dal continuo contatto con la civiltà ellenistica attraverso i Greci deportati come schiavi e i libri e le opere d'arte depredati. Occorsero però per questo diverse generazioni.

Le circostanze nelle quali giunse a Roma il primo quadro ellenistico sono riferite da Plinio. Con il saccheggio di Corinto del 146 a.C. i Romani si erano impadroniti di molte opere d'arte, che misero all'asta. Per un quadro del pittore Aristide il re di Pergamo offrì una cifra così alta che il generale romano Lucio Mummio si impadronì del quadro e lo portò a Roma pensando che dovesse trattarsi di un oggetto con poteri magici. [13] Una cinquantina d'anni più tardi l'incivilimento dei Romani aveva già fatto notevoli passi avanti, come dimostrato, ad esempio, dal senatoconsulto del 97 a.C. che abolì i sacrifici umani. [14]

Dalla metà del II secolo a. C. non esistevano quasi più centri culturali ellenistici. Per qualche tempo svolse un ruolo importante Rodi, ma anche la sua possibilità di finanziare le ricerche declinò ben presto e infine venne meno del tutto con il saccheggio romano. Le guerre si conclusero infine nel 30 a.C. con la conquista di Alessandria, che completò l'incorporazione di tutto il mondo mediterraneo nel dominio di Roma.

È nel I secolo a.C. che rinasce l'interesse per Aristotele che, anche a detta di Cicerone, fino ad allora era stato quasi del tutto ignorato dai filosofi. [15]

La Biblioteca di Alessandria sopravvisse alla conquista romana, [16] ma le altre biblioteche ellenistiche furono in genere prede di guerra che andarono ad aumentare il lusso delle ville dei generali vincitori. [17] La fine delle biblioteche dovette avere

[13] Plinio, *Naturalis historia*, XXXV, 24. Lo stesso Lucio Mummio portò a Roma anche i risonatori di bronzo (cfr. sopra, p. 221) che avevano arricchito l'acustica del teatro di Corinto, da lui distrutto; non li prese per interesse per l'acustica, naturalmente, ma per farne offerte votive alla Luna (Vitruvio, *De architectura*, V, v, 8).

[14] Plinio, *Naturalis historia*, XXX, 12.

[15] Cicerone, *Topica*, iii. L'interesse per Aristotele fu risvegliato dall'edizione romana delle sue opere (un esemplare delle quali era giunto a Roma come parte del bottino di Silla dopo il saccheggio di Atene dell' 86 a.C.). L'edizione fu curata dal grammatico Tirannione, che, condotto a Roma come schiavo da Lucullo, fu poi usato come bibliotecario e precettore da Cicerone.

[16] L'incendio di libri avvenuto poco dopo l'arrivo di Cesare in Egitto, che un tempo si credeva avesse distrutto la Biblioteca, riguardò infatti solo un deposito presso il porto; la Biblioteca continuò a esistere fino all'epoca di Aureliano, quando, durante la guerra contro Zenobia, alla fine del III secolo d.C., avvenne la sua prima vera distruzione. Cfr. [Canfora], pp. 76 sgg. e p. 201.

[17] Cfr., ad esempio, [Fedeli], pp. 31 sgg.

un effetto non trascurabile sulla crisi della scienza, come dovette averlo la moda, che si diffuse tra gli aristocratici romani, di avere dei Greci colti come schiavi da usare come lettori, pedagoghi e copisti. Cicerone, in una lettera al fratello Quinto, si lamenta della cattiva qualità dei libri in latino: a Roma si potevano trovare facilmente solo libri in greco che non fossero pieni di errori di copia.[18] Dobbiamo dedurne che dovevano esservi a Roma molti più copisti grecofoni che di lingua latina e ciò dà un'idea dell'intensità delle deportazioni che avevano colpito l'esigua classe degli intellettuali greci degli stati ellenistici.

8.2. *I Romani, la scienza e la tecnologia scientifica*

Quale fu il rapporto dei Romani con la scienza? Per descrivere il livello dell'interesse romano per il metodo scientifico potrebbe essere sufficiente ricordare quale fu la prima traduzione latina degli *Elementi* di Euclide: sembra sia stata quella di Adelardo; erano gli anni intorno al 1120 e Adelardo (di Bath) era un inglese che traduceva dall'arabo.[19]

Quando Varrone, elencando nel suo manuale sull'agricoltura i trattati su questo argomento, prende in considerazione gli scritti di Teofrasto, dice che essi erano "non tam idonei iis qui agrum colere volunt quam qui scholas philosophorum".[20]

Perché i libri di Teofrasto, che esponevano tra l'altro i principi in base ai quali era stata riformata la viticultura in tutto il mondo ellenistico,[21] vengono considerati da Varrone libri filosofici privi di utilità pratica? Evidentemente perché Teofrasto espone delle "teorie": Varrone, che è stato certamente il maggiore degli eruditi romani, è respinto da tali opere, che non capisce, e ne inquadra il contenuto nell'ambito dell'unica "teoria" di cui conosce l'esistenza: la filosofia.

Varrone è un esponente di una cultura prescientifica, del tutto estranea alla scienza. Gli scrittori romani di epoca imperiale, come Plinio o Seneca, sono invece affascinati dalla lettura di opere scientifiche ellenistiche delle quali, non potendo seguire la logica delle argomentazioni, apprezzano le conclusioni proprio perché giungono loro inaspettate e meravigliose; credono quindi di poter emulare i loro modelli eliminando i nessi logici

[18] Cicerone, *Ad Quintum fratrem*, III, 5, 6.

[19] Cfr., ad esempio, [Heath: *Elementi*], vol. I, p. 93. Un libro divertente in cui è mostrata l'inesistenza di una "scienza romana" è [Stahl].

[20] Varrone, *De re rustica*, I, v, 1-2.

[21] Cfr. sopra, pp. 187-188.

o sostituendoli con connessioni che, anche se arbitrarie, sono più facilmente immaginabili e portano più rapidamente al risultato voluto, che è la meraviglia del lettore. Il contatto con i risultati di una "scienza" la cui metodologia resta del tutto ignota ha cioè come principale effetto il venir meno della fiducia nel semplice buon senso, che, mentre non mancava a scrittori come Varrone, viene ora completamente abbandonato.

Plinio altera talmente le sue fonti da rendere difficile anche riconoscere le nozioni note. Ecco un esempio:

> Soltanto alcune bestie da soma avvertono dei mal d'occhi durante la fase crescente della luna. Ma solo l'uomo guarisce dalla cecità con l'emissione di fluido dall'occhio. A molti è stata restituita la vista dopo venti anni di cecità [...]. Gli autori più competenti affermano che gli occhi sono legati al cervello da alcune vene. Io crederei che siano collegati allo stomaco: certamente non si può cavare un occhio a qualcuno senza che vomiti. [22]

Se non sapessimo che da secoli si eseguivano operazioni di rimozione delle cateratte [23] e che i nervi ottico e oculomotore erano stati descritti da Erofilo, sarebbe davvero difficile capire di quale "emissione di fluido" e di quali "vene" parlassero le fonti di Plinio.

Plinio, che dedica molte pagine della sua opera a una descrizione della vita delle api, avendo evidentemente letto qualcosa sul motivo della forma esagonale delle celle dei favi (probabilmente la spiegazione riferita da Pappo, che abbiamo ricordato nella p. 189), sostituisce le complesse argomentazioni scientifiche con la spiegazione seguente, che gli appare certo più semplice:

> Ogni cella è esagonale, perché ognuna delle sei zampe dell'ape ha fatto un lato. [24]

Plinio riporta nella sua opera la misura del meridiano, di 252.000 stadi, attribuendola correttamente a Eratostene e mostrando ammirazione per il risultato. Racconta poi la storia di un certo Dionisodoro che, dopo morto, sarebbe sceso dal suo sepolcro fino al centro della Terra contando i passi necessari; ritornato nella tomba, vi avrebbe lasciato una lettera ai vivi con l'indicazione della distanza percorsa, di 42.000 stadi. Plinio, che precisa che la lettera era firmata, dapprima mostra incredulità per la sua storia, ma poi spiega che dei "geometri" erano riusciti a dedurre la lunghezza del meridiano, di 252.000 stadi, dalla lunghezza del raggio fornita da Dionisodoro. [25]

[22] Plinio, *Naturalis historia*, XI, 149.
[23] Cfr. sopra, p. 203.
[24] Plinio, *Naturalis historia*, XI, 29.
[25] Plinio, *Naturalis historia*, II, 247-248.

La deduzione geometrica che aveva destato l'ammirazione di Plinio era quindi quella della misura della circonferenza da quella del raggio (usando, peraltro, il valore 3 per π). Al di là di questa moltiplicazione, egli riesce a concepire solo una misura diretta e una "dimostrazione" giuridica: la firma della lettera. Non si tratta naturalmente di stupidità. Il procedimento di Eratostene, consistente nell'usare una "teoria scientifica" come modello del mondo concreto, non può assolutamente essere compreso da Plinio, che appartiene a una cultura prescientifica. Egli è quindi costretto a sostituire il vero viaggio intellettuale di Eratostene, dal mondo alla teoria e viceversa, con l'immaginario viaggio concreto di Dionisodoro, cui pure aveva affermato di non voler credere.

Secondo Seneca il vino colpito dal fulmine si congela, tornando allo stato liquido esattamente dopo tre giorni, dopo di che uccide o rende pazzo chi lo beve. Egli accenna a sue "ricerche" sul motivo di questi effetti dei fulmini.[26] La sua trattazione della catottrica, dopo una breve introduzione "scientifica" (in cui viene lasciata aperta la questione dell'eventuale esistenza di simulacri degli oggetti specchiati dietro lo specchio[27]) contiene, come pezzo forte, un lungo racconto dell'uso osceno di specchi ingrandenti da parte di un omosessuale, racconto che permette a Seneca di concludere brillantemente la sua trattazione auspicando la distruzione di tutti gli specchi.[28]

Scritti come questi di Plinio e di Seneca sono stati considerati per secoli dei capolavori della "scienza antica", che, avendo concentrato tutte le conoscenze degne di essere tramandate, avevano rese inutili le tante opere scientifiche perdute. Gibbon, nella famosa e influente *History of the decline and fall of the Roman empire* (1776-1788), scriveva che scrittori come Plinio:

> avevano letto e confrontato le opere dei loro predecessori, né abbiamo ragionevole motivo di credere che qualche verità importante sia stata sottratta alla nostra curiosità.

Quanto all'atteggiamento dei Romani verso le innovazioni tecnologiche, vediamo cosa ne scriveva Seneca:

> Anche la questione se sia stato adoperato per primo il martello o la tenaglia non mi pare di gran peso. Entrambe le invenzioni mi sembrano frutto di un ingegno vivace e acuto, non profondo né elevato. E così avviene di tutto ciò che si deve cercare stando col corpo curvo e con lo sguardo rivolto al suolo. [...]
> È risaputo che alcune cose sono comparse solo ai nostri tempi, come ad esempio l'uso di lastre alle finestre che lasciano passare at-

[26] Seneca, *Naturales quaestiones*, II, xxxi, 1 e liii, 1.
[27] Seneca, *Naturales quaestiones*, I, v, 1.
[28] Seneca, *Naturales quaestiones*, I, xvi-xvii.

traverso il vetro trasparente la luce del giorno, o le alte volte dei bagni con tubi inseriti nelle pareti per convogliare dovunque il calore e assicurarne la distribuzione uniforme in tutte le direzioni [...] Tutte queste sono invenzioni di individui inferiori; la sapienza siede su un trono più alto: e non le mani, ma le anime sono oggetto dei suoi ammaestramenti. [29]

Elementi delle tecniche ellenistiche di produzione sono lasciati sopravvivere nelle province, ma vi è, soprattutto nei primi due secoli della nostra era, un costante freno alla loro diffusione in Italia. Questo fenomeno è stato studiato in dettaglio nel caso della ruota idraulica. [30]

Vitruvio, che è stato certamente il massimo esperto romano dell'argomento, nel *De architectura* cerca di offrire un quadro completo della tecnologia: dalla costruzione degli edifici a quella degli automi, da quella degli orologi a quella degli organi e delle macchine belliche. Mostriamo con un esempio il suo livello di comprensione della tecnologia scientifica. Dopo avere descritto le livelle ad acqua, Vitruvio scrive:

Forse chi ha letto le opere di Archimede dirà che un vero livellamento non può ottenersi con l'acqua, poiché egli afferma che la superficie dell'acqua non è livellata [*libratam*], ma è la superficie di una sfera il cui centro è il centro della Terra. [31]

Vitruvio non comprende quindi né che la superficie degli oceani può essere allo stesso tempo orizzontale e sferica, né che la sfericità della superficie terrestre non può avere alcun effetto su oggetti delle dimensioni di una livella ad acqua. Egli crede di superare la presunta difficoltà con l'osservazione seguente:

È necessario che dove viene versata l'acqua si abbia una curvatura al centro, ma è anche necessario che gli estremi destro e sinistro siano livellati tra di loro. [32]

Non si tratta naturalmente di limiti personali, ma di una conseguenza inevitabile dell'assenza del concetto di "modello teorico". [33] Nell'opera di Vitruvio l'idrostatica di Archimede

[29] Seneca, *Epistulae ad Lucilium*, 90.
[30] Cfr. [Bloch MA], cap. ii.
[31] Vitruvio, *De architectura*, VIII, v, 3.
[32] Vitruvio, *ibid.*
[33] Va detto, a suo onore, che Vitruvio, a differenza di altri autori, è ben consapevole di quanto sia difficile comprendere e tradurre le fonti greche. A proposito dell'acustica, ad esempio, egli scrive che essa è esposta in opere "oscure e difficili, soprattutto per chi ignora la lingua greca" (*De architectura*,

viene ridotta alla scoperta che, immergendo un corpo in una vasca piena, ne trabocca una quantità di liquido eguale in volume al corpo immerso. Dopo aver riferito questa "scoperta" come una delle più geniali di Archimede, Vitruvio conclude il suo resoconto dell'idrostatica raccontando la storiella di Archimede che corre a casa nudo e urlante.[34]

Vitruvio rende il massimo riconoscimento di uno scrittore latino al ruolo della scienza applicata. Enumerando tutte le conoscenze necessarie a un buon "architetto" (termine che nella sua opera indica il costruttore di tutti i prodotti prima elencati), egli infatti, oltre alle belle lettere, la storia, la filosofia, la medicina, la musica e gli studi giuridici, include anche la geometria, l'aritmetica e l'astronomia.[35] L'utilità dell'aritmetica è però spiegata con l'esigenza di riuscire a calcolare i costi totali degli edifici; l'astronomia è considerata necessaria per distinguere i quattro punti cardinali[36] e la geometria per capire l'uso di squadre e livelle. Molto più spazio è dedicato alla "storia" (intesa come raccolta di aneddoti la cui conoscenza permette al buon architetto di render conto dei personaggi raffigurati nelle statue ornamentali) e agli studi giuridici, considerati necessari sia per la stesura dei contratti che per seguire le varie e lunghe liti giudiziarie che il più delle volte accompagnano la costruzione di edifici.

Se questo è il livello del massimo ingegnere romano,[37] non stupisce che Roma dipenda per tutte le attività produttive con contenuto tecnologico dall'importazione dall'Oriente o dei prodotti finiti o dei lavoranti.

V, iv, 1). Analogamente Lucrezio, che era stato l'intellettuale latino che più si era avvicinato alla comprensione della scienza ellenistica, all'inizio del suo poema sottolinea come fosse difficile cercare di rendere in latino "le oscure scoperte dei Greci" (*Graiorum obscura reperta*; *De rerum natura*, I, 136-139). Naturalmente è ancora più difficile per noi la traduzione inversa: riuscire cioè a ricostruire le fonti perdute usando gli scritti di chi, nella migliore delle ipotesi, le considerava "oscure".

[34] Vitruvio, *De architectura*, IX, praef., 9-12. Nonostante il trattato di Archimede *Sui galleggianti* si sia conservato, sull'argomento dell'idrostatica archimedea Vitruvio ha continuato, per più di due millenni, ad essere una fonte preferita allo stesso Archimede (come si può notare leggendo, ad esempio, [Boyer], pp.145-146, oppure [Geymonat], vol. I, p.298).

[35] Vitruvio, *De architectura*, I, i.

[36] Conoscenze astronomiche superiori sono ritenute necessarie solo ai costruttori di orologi, che debbono arrivare a rendersi conto del variare della durata del giorno con le stagioni.

[37] Gli altri scrittori latini di argomenti tecnologici sono di livello inferiore. Ad esempio Frontino, che è l'autore del principale trattato latino sugli acquedotti, confonde sistematicamente la portata di una conduttura con l'area della sua sezione (ignorando così, in particolare, il ruolo della pendenza); cfr. Frontino, *De aquis*, I, 25-63.

Roma è sostanzialmente una città parassita, come risulta sia da un esame dell'interscambio commerciale (giungono nel porto di Ostia navi colme di prodotti da tutto l'impero; non riparte praticamente nulla) che dall'altissimo livello della disoccupazione durante tutto il periodo imperiale. La popolazione di Roma vive in larga misura di elargizioni, sia private (ogni ricco proprietario mantiene, oltre a moltissimi schiavi, un esercito di "clienti" a lui devoti) che pubbliche: già Cesare aveva introdotto le *frumentationes*, cioè periodiche distribuzioni gratuite di grano proveniente dalle province; da Augusto in poi la plebe di Roma ricevette inoltre periodicamente sia altri generi alimentari e di vestiario, sia elargizioni in denaro e altri benefici (come l'accesso gratuito a spettacoli e terme).[38]

Avevamo notato come le esportazioni industriali di Alessandria costituissero un forte indizio del rapporto tra scienza, tecnologia ed economia. Il fatto che all'estraneità di Roma alla scienza corrisponda la natura parassitaria della sua economia ne sembra un'importante conferma.

Se tutto ciò è vero, allo sfaldarsi dell'impero la sorte dell'Occidente è segnata. Da Diocleziano in poi gli imperatori che possono farlo si trasferiscono tutti in Oriente. Quando poi l'Islam occupa i resti di quello che era stato il mondo ellenistico, si ha la fine della civiltà in Europa.

Nell'VIII secolo il più grande matematico dell' Occidente è considerato Beda il venerabile: nel suo lavoro più impegnativo egli descrive un metodo per rappresentare i numeri con gesti delle mani. Molti sapevano ancora farlo fino al numero dieci, ma Beda, usando una specie di alfabeto per sordomuti, riesce ad arrivare un po' più in là. Quando il più grande "matematico" vivente in Europa è a questo livello la vita urbana vi è già scomparsa. Anche in Europa, tuttavia, sopravvissero (o furono presto recuperati) alcuni residui dell'antica tecnologia: in particolare i mulini ad acqua nelle campagne e gli organi nelle chiese continuarono a testimoniare il ricordo della civiltà perduta.

[38] Per Augusto cfr., ad esempio, [Last]. Un libro di facile lettura su quest'argomento, che fornisce anche dei dati quantitativi, è [Weber]. Nel suo libro Weber sottolinea (a p. 266) che sommando il denaro di tutte le elargizioni note degli imperatori non si giunge a cifre sufficienti al sostentamento di tutta la popolazione della città. È però chiaro che a questo scopo era più che sufficiente il flusso di ricchezza convogliato a Roma da tutto l'impero (oltre alle tasse, pagate solo dai provinciali, e ai bottini di guerra giungevano a Roma le rendite dei latifondi e delle miniere di proprietà dei ricchi romani). Quanto ai canali attraverso i quali parte di tali risorse giungeva al grosso della popolazione, è facile immaginarne diversi e anche provarne l'esistenza, ma non è ragionevole sperare di documentarli in modo contabilmente esaustivo.

Un tempo si attribuiva il declino della civiltà europea nell'alto Medio Evo alle invasioni barbariche. Pirenne sottolineò per primo come le principali strutture economiche e civili fossero sopravvissute all'arrivo delle popolazioni germaniche,[39] individuando la vera svolta nell'espansione dell'Islam, che, rompendo l'unità del Mediterraneo e distruggendo il commercio di lunga distanza, aveva provocato il decadimento della vita urbana.

Questa tesi è stata poi criticata, sottolineando come sia nel mondo islamico che nell'impero bizantino avessero continuato a esistere metropoli. All'atto della frattura individuata da Pirenne le parti in cui il mondo mediterraneo restò diviso non erano evidentemente equivalenti. Mentre lungo la costa sud-orientale del Mediterraneo (grazie forse al livello tecnologico?) vi era la possibilità di un'economia urbana, le città della parte europea o erano state, come Roma, centri amministrativi oppure città portuali; per la loro esistenza era stato in ogni caso essenziale l'interscambio con l'Oriente. Secondo Flavio Giuseppe ai suoi tempi (I secolo d.C.) Roma era nutrita per due terzi dai raccolti inviati come tributo dall'Egitto e dalla provincia d'Africa.[40] Non è quindi sorprendente che la fine dei legami politici tra Roma e l'Egitto abbia comportato la scomparsa della vita urbana a Roma e non ad Alessandria.

Come mai i regni ellenistici furono conquistati da Roma? L'idea di una civiltà ellenistica "decadente" sembra avvalorata dalla conquista, che sembra inserirsi male nel quadro finora descritto di un sistema economico-tecnologico ellenistico superiore a quello romano. Forse fu proprio il successo del progetto di Alessandro di ellenizzazione a determinare la fragilità delle costruzioni politiche ellenistiche. L'estensione dell'egemonia greca a una parte considerevole del mondo, dalla Gallia meridionale ai confini con la Cina, dal Mar Nero alla Nubia, aveva infatti disperso talmente gli emigrati greci, che in molti stati essi rischiavano di essere numericamente insufficienti per i bisogni di un'efficiente classe dirigente. I primi Tolomei affrontarono il problema non solo attirando l'immigrazione di Greci, ma anche cercando di assimilare sia un'élite di Egiziani sia, soprattutto, la numerosa comunità ebraica. Questa politica, anche se ottenne dei successi parziali, finì con un completo fallimento, in quanto la stessa dinastia si lasciò assimilare in qualche misura dalla cultura indigena.

Con la conquista romana cessò il rapporto scienza-politica, fallì cioè l'idea dei primi sovrani ellenistici di usare la scienza

[39] In particolare in [Pirenne VMA] e [Pirenne MC].
[40] Flavio Giuseppe, *Bellum judaicum*, II, 16, 383.

come strumento di potere; a questo scopo si rivelarono ben più efficienti l'organizzazione militare e il diritto.

Il rapporto scienza-tecnologia-economia sopravvisse tuttavia in Oriente, sia pure a un livello via via inferiore. La supremazia scientifica delle città ellenistiche continuò infatti ad essere accompagnata dalla supremazia tecnologica ed economica non solo durante tutto l'arco di esistenza dell'impero romano ma ben oltre. La scelta romana di privilegiare gli strumenti giuridici e militari del dominio sugli aspetti tecnologici ed economici, se fu all'origine della vittoria, rese anche inevitabile che al crollo della costruzione politica di Roma si accompagnasse il crollo allo stesso tempo culturale ed economico dell'Occidente.

8.3. *La fine della scienza antica*

Il livello della scienza dei primi due secoli della nostra era, per quanto basso rispetto a quello del primo ellenismo, è molto alto se misurato con il metro dei periodi successivi. In alcuni casi, come in quello della *Collezione* di Pappo, del IV secolo d.C., la qualità dei risultati esposti è ancora molto alta; non si tratta però di opere originali ma, appunto, di collezioni di risultati precedenti, la cui importanza è dovuta alla perdita delle fonti. Il livello scientifico di Pappo può essere valutato quando i suoi contributi possono essere esaminati insieme alla fonte, come nel caso del suo commento all' *Almagesto*; diviene allora chiaro che non si tratta di un vero scienziato, ma di una persona dotata di scarsa autonomia intellettuale.[41]

Sesto Empirico critica aspramente il metodo scientifico, in cui non crede. Egli è però ancora un esponente della stessa cultura cui erano appartenuti gli scienzati e i filosofi contro cui polemizza; Sesto è in grado di leggere le loro opere e di usare contro di loro argomenti espressi nel linguaggio razionale dell'antica filosofia. Non a caso l'opera di Sesto Empirico è, tra l'altro, una delle principali fonti utilizzabili per ricostruire la logica proposizionale e la semantica.

Successivamente in quelli che erano stati i centri dell'ellenismo prendono definitivamente il sopravvento correnti irrazionalistiche. Le conoscenze chimiche, contaminate da elementi magico-religiosi, danno origine all'alchimia e le conoscenze astronomiche sopravvissute vengono usate come linguaggio utile per la formulazione degli oroscopi. La scienza è sopraffatta dalle nuove pseudoscienze, che, almeno dal punto di vista del-

[41] Su questo punto cfr., per esempio, [Neugebauer, HAMA], p. 968.

l'interesse del pubblico, da allora non hanno più ceduto la loro posizione di predominio.

La filosofia ellenistica è ormai divenuta incomprensibile e ci si rivolge verso autori sempre più lontani nel tempo: all'interesse per Aristotele e per Platone, che era iniziato a formarsi nel I secolo a.C., si aggiunge e si sovrappone l'interesse per Pitagora. Grazie al ritorno alla numerologia pitagorica propugnato dai neopitagorici, anche la matematica è inserita in un ambito di pensiero dominato dall'irrazionalismo.[42]

Tra gli autori inseriti forzatamente nella tradizione pitagorica vi è Ipparco di Nicea. Venne compilata, in particolare, una *lettera di Liside a Ipparco*,[43] nella quale il pitagorico Liside rimprovera Ipparco per avere diffuso la conoscenza all'esterno della scuola, violando il segreto. All'origine di questo anacronismo (Liside è un pitagorico del V secolo a.C. e Ipparco vive tre secoli più tardi) vi è certamente una confusione tra Ipparco e Ippaso di Metaponto.[44] Grazie a questo scritto apocrifo, Ipparco fu considerato da molti, in epoca moderna, un esponente della scuola pitagorica: ad esempio da Copernico, che riportò una traduzione della *lettera di Liside a Ipparco*, ritenendola autentica, nel *De revolutionibus*.[45]

Anche le contaminazioni di antiche tradizioni con residui scientifici finirono con l'avere vita difficile e ogni residuo dell'antica cultura fu infine distrutto. Il Serapeo, che era stato la prima biblioteca pubblica, fu fatto demolire dal patriarca di Alessandria, Teofilo, nel 391. Nel 415, come abbiamo già ricordato, Ipazia, ultima commentatrice di opere scientifiche ad Alessandria, fu linciata.

[42] Tra le testimonianze di questa tendenza, oltre alle opere di Nicomaco e di Giamblico, ricordiamo i *Theologoumena arithmeticae* che furono attribuiti a Giamblico.

[43] La lettera fu pubblicata in [Musurus]. Una versione abbreviata è riportata da Giamblico (*Vita pitagorica*, 75-78).

[44] La *lettera di Liside a Ipparco* fu infatti compilata sul modello di una *lettera di Liside a Ippaso*, un brano della quale è in Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VIII, 42. In questa seconda lettera (più plausibile, anche se probabilmente altrettanto apocrifa) Liside rimprovera Ippaso per aver insegnato pubblicamente a estranei alla scuola. Ippaso di Metaponto è appunto il pitagorico che secondo la tradizione avrebbe divulgato segreti della scuola. D'altra parte Ippaso è chiamato *Ipparco* anche da Clemente Alessandrino (*Stromata*, V, 58). Uno scolio al *Fedone* di Platone (riportato in [Diels] alla voce *Filolao*, nella test. 1a) associa Ipparco a Filolao, come i due soli pitagorici che si salvarono dalla persecuzione di Cilone (ponendo così Ipparco nel ruolo che la tradizione assegna a Liside).

[45] La traduzione di Copernico della lettera, inclusa nel manoscritto del I libro, venne soppressa nell'edizione del 1543 e nelle successive, ma è stata pubblicata da Koyré nella sua edizione del *De revolutionibus orbium caelestium*.

9. La scienza perduta

Gli scritti scientifici ellenistici che ci sono rimasti non solo sono una piccola parte del totale, ma spesso sono stati anche alterati da redattori di epoche successive che li hanno adattati alle proprie concezioni. In questo capitolo cercheremo di ricostruire, in alcuni casi, idee e procedimenti della scienza ellenistica perduta.

9.1. *Le prime definizioni degli* Elementi *di Euclide* [1]

Nella storia del pensiero si sono alternate due concezioni profondamente diverse delle definizioni. Secondo la prima, che chiameremo *essenzialista* o *platonica*, in quanto fu propria di Platone, anche se fu condivisa da Aristotele, [2] lo scopo delle definizioni è quello di individuare la vera essenza dell'ente definito. Nel caso della matematica ciò presuppone che gli enti matematici abbiano una propria realtà oggettiva. Secondo l'altra concezione, che chiameremo *nominalista*, una definizione consiste semplicemente nell'introdurre un nome come etichetta per individuare più brevemente una lunga espressione. L'esistenza dell'oggetto individuato dalla lunga espressione o dal nuovo nome deve naturalmente essere accertata con altri mezzi e nel caso della matematica può essere garantita dalla sua costruibilità geometrica.

A chi condivide la seconda concezione non può non essere chiara la necessità di evitare un rinvio all'infinito assumendo come punto di partenza alcuni enti elementari non definiti (se non implicitamente, enunciando i postulati che li riguardano).

[1] Il contenuto di questo paragrafo è tratto da [Russo1] e [Russo 8].

[2] Cfr. sopra, p. 71, n. 54; per l'opinione di Aristotele che definire qualcosa significhi individuarne l'essenza, cfr., ad esempio, *Topica* I, 5, 101b, 36; *Metaphysica*, VII, 5, 1031a, 13; VIII, 1, 1042a, 17. Sul sostanziale accordo di Aristotele con Platone su questo argomento cfr. [Popper OSE], vol. II, pp. 10-11.

Quest'ultima scelta non è di origine moderna, come il suo lungo abbandono può far ritenere, ma è già documentata nella filosofia pre-ellenistica. Aristotele riferisce infatti che secondo i membri della scuola di Antistene, poiché ogni definizione richiede il riferimento a qualcos'altro, è possibile definire solo ciò che è composto (sia nel senso materiale che in quello concettuale) e non ciò che è semplice.[3]

Quanto ai matematici ellenistici, la concezione nominalista non solo è l'unica compatibile con il costruttivismo che abbiamo attribuito loro nel §2.8 e con il loro convenzionalismo linguistico,[4] ma è anche direttamente documentata dalla forma di un gran numero di definizioni.[5] Anche l'uso di definire implicitamente, attraverso i postulati, gli enti matematici elementari è ampiamente documentato, in particolare nelle opere di Archimede.[6]

Nel caso di Euclide molti elementi fanno pensare che egli condividesse la posizione nominalista e costruttivista,[7] che è però apertamente contraddetta dalle prime definizioni del I libro degli *Elementi*, che riguardano gli enti geometrici fondamentali: punto, linea, retta, superficie e piano (e da poche altre). Ricordiamo, come esempi, le definizioni 1 e 4:

> punto è ciò che non ha parti[8];
> linea retta è quella che giace allo stesso modo rispetto a [tutti] i suoi punti.[9]

Queste definizioni, che non hanno alcuna analogia nelle opere di Archimede e di Apollonio, sono chiaramente di tipo platonico-essenzialista.

La definizione di linea retta è particolarmente oscura.[10] L'u-

[3] Aristotele, *Metaphysica*, VIII, 3, 1043b, 23-32.

[4] Cfr. sopra, pp. 162-163 (in particolare la n. 29).

[5] Un chiaro segno della concezione nominalista dei matematici ellenistici è dato dalle tante definizioni in cui una lunga espressione, mediante il verbo καλεῖται o καλείσθο (*è detto*, oppure *sia detto*) viene designata con un nuovo termine.

[6] Questo metodo è usato, ad esempio, nel trattato *Sull'equilibrio delle figure piane* per la nozione di *baricentro* e nel I libro del trattato *Sulla sfera e sul cilindro* per la nozione di *lunghezza* di una classe di curve.

[7] Cfr. sopra, §2.8. Il metodo della definizione implicita sembra usato da Euclide, ad esempio, per il termine ἴσος, che assume il significato di *eguale in estensione* attraverso l'uso delle *nozioni comuni* (è questa anche l'opinione di Heath; cfr. [Heath: *Elementi*], vol. I, p. 327). L'esempio, già ricordato nel §2.8, del nuovo termine introdotto da Euclide per il concetto di punto fa ritenere che Euclide condividesse il convenzionalismo linguistico.

[8] σημεῖόν ἐστιν, οὗ μέρος οὐθέν.

[9] εὐθεῖα γραμμή ἐστιν, ἥτις ἐξ ἴσου τοῖς ἐφ' ἑαυτῆς σημείοις κεῖται.

[10] Heath conclude l'analisi di tale definizione affermando che "the language is thus seen to be hopelessly obscure" ([Heath: *Elementi*], vol. I, p. 167).

nica interpretazione possibile sembra quella che la linea retta sia "vista" da tutti i suoi punti allo stesso modo, cioè che esistano movimenti rigidi che, lasciando invariata la linea, portino alla sovrapposizione di due qualsiasi dei suoi punti. Questa proprietà (della quale, come abbiamo visto a p. 118, si sarebbe poi occupato anche Apollonio) non caratterizza però le rette, ma, tra le linee piane, è condivisa anche dalle circonferenze. È strano che Euclide non si fosse reso conto che anche le circonferenze "giacciono allo stesso modo rispetto a tutti i loro punti".

La necessità di evitare un regresso all'infinito lasciando non definiti alcuni enti fondamentali è del tutto analoga a quella di fondare le catene dimostrative su postulati non dimostrabili. Come mai Euclide, che è l'autore della prima opera a noi nota nella quale le dimostrazioni sono esplicitamente basate su postulati indimostrabili,[11] non si sarebbe reso conto di dover assumere degli enti elementari non definiti? È vero che nel pensiero matematico medievale e moderno la necessità di termini indefiniti sembra essere stata molto meno condivisa di quella di postulati indimostrabili, ma in questo caso la differenza può spiegarsi proprio con l'enorme autorità della redazione trasmessa degli *Elementi*.

Gli *Elementi* ci sono pervenuti attraverso tarde redazioni, contenenti molte interpolazioni,[12] e le definizioni qui considerate, metodologicamente estranee al resto degli *Elementi*, si inseriscono bene nel clima culturale dell'epoca imperiale. Siamo certi che siano di Euclide? Nel VII libro degli *Elementi* l'unità viene definita come "ciò per cui ciascuna delle cose esistenti viene detta 'uno'". Tale "definizione", analoga a quelle che qui ci interessano, viene attribuita da Giamblico (circa 300 d.C.) a scrittori "più recenti" (οἱ νεώτεροι).[13] Analoghi inserimenti di definizioni platoniche a opera di autori più recenti avrebbero potuto riguardare gli enti geometrici fondamentali.[14]

[11] I "primi principi" di cui parla Aristotele hanno ben poco in comune con i postulati di Euclide. Aristotele pensa piuttosto a definizioni di tipo essenzialista, che avrebbero dovuto fornire la base sia per i teoremi che per altre definizioni (cfr. sopra, p. 65).

[12] Quasi tutti i manoscritti risalgono alla redazione di Teone di Alessandria, del IV secolo d.C. L'inattendibilità di tale redazione è mostrata da Teone stesso, che, nel suo commento al III libro dell' *Almagesto*, parla di un teorema da lui dimostrato e inserito nella sua edizione degli *Elementi*. Un codice contenente una stesura più antica fu trovato da Peyrard nella Biblioteca Vaticana. La redazione trasmessa dal codice vaticano (contenente anch'essa varie interpolazioni di carattere illustrativo ed esplicativo, riconosciute come tali dagli studiosi moderni) risale probabilmente al III secolo d.C.

[13] Giamblico, *In Nicomachi arithmeticam introductionem*, 11.5.

[14] Il sospetto che le prime definizioni degli *Elementi* non siano genuine è già in [Loria], pp. 201-202. Ci si può domandare perché i compilatori di epoca imperiale avrebbero dovuto accettare postulati indimostrabili e rifiutare enti elemen-

Nella ricerca di riscontri oggettivi al sospetto che le prime definizioni degli *Elementi* siano un'interpolazione, possiamo usare due tipi di documenti: i ritrovamenti papiracei e le testimonianze di autori che avevano potuto leggere l'opera di Euclide in stesure più antiche di quelle che ci sono rimaste.

Tra i pochi papiri contenenti frammenti degli *Elementi*, solo due riguardano definizioni del I libro e forniscono apparentemente ben poco aiuto. Uno dei due papiri contiene le prime dieci definizioni del I libro, ma è molto tardo, risalendo al III secolo d.C. [15]; l'altro, cronologicamente ben più interessante, proviene da Ercolano e non contiene "definizioni" di enti fondamentali, ma solo quella, del tutto corretta, di cerchio [16]; va notato, comunque, che tale definizione non coincide con quella contenuta nelle redazioni note degli *Elementi*. [17]

Tra le testimonianze degli antichi autori è particolarmente importante quella di Sesto Empirico, che scrive prima delle redazioni rimaste dell'opera di Euclide e affronta più volte l'argomento delle definizioni degli enti geometrici. L'interesse della sua testimonianza è accresciuto dalla circostanza che egli sembra riportare la definizione di cerchio non nella forma rimasta negli *Elementi*, ma in quella documentata dal papiro ercolanese [18]; possiamo quindi pensare che egli disponesse di una edizione degli *Elementi* se non altro meno corrotta di quelle a noi note. [19]

tari non definiti. La risposta è semplice: la tradizione pre-euclidea poteva fornire molte definizioni platoniche di oggetti geometrici elementari, ma certamente nessuna dimostrazione dei postulati di Euclide. Diversi tentativi di dimostrazione sono comunque documentati in epoca imperiale nel caso del quinto postulato. Si può anche immaginare che in qualche caso un tentativo del genere, considerato riuscito, abbia trasformato un postulato di Euclide in una proposizione fornita di una pseudodimostrazione. Si può sospettare, in particolare, che questo sia stato il caso della proposizione I, 4 (ossia del cosiddetto "primo criterio di eguaglianza dei triangoli"). La "dimostrazione" di tale proposizione è infatti molto sospetta, soprattutto perché non usa né postulati né proposizioni precedenti.

[15] P. Mich. iii, 143. Questo papiro, scritto probabilmente da uno scolaro, contiene le prime dieci definizioni praticamente nella stessa forma in cui sono rimaste negli *Elementi*, ma manca di qualsiasi riferimento a Euclide. Esso dimostra quindi che all'epoca della sua scrittura le definizioni degli enti geometrici fondamentali erano insegnate nella forma poi inclusa negli *Elementi*, ma non che fossero attribuite già allora a Euclide.

[16] P. Hercul. 1061.

[17] In particolare il termine *circonferenza* (περιφέρεια) è usato nel papiro senza essere esplicitamente definito, mentre una sua definizione è interpolata nella definizione di cerchio contenuta nelle redazioni trasmesseci dell'opera di Euclide.

[18] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, III, 107.

[19] Heiberg, sulla base di vari elementi, giunge alla conclusione che Sesto disponesse ancora dell'edizione originale di Euclide (cfr. i *Prolegomena* all'edizione critica degli *Elementi* in [Euclidis OO], vol.V).

Poiché Sesto Empirico sembra citare più volte alcune delle definizioni degli enti geometrici fondamentali incluse nel I libro degli *Elementi*, e in particolare quelle di punto, linea, superficie e linea retta, la sua testimonianza appare a prima vista favorevole alla tesi della loro autenticità. Esaminiamo in particolare la citazione di Sesto della "definizione" di punto. Sesto scrive che "i matematici, descrivendo" (ὑπογράφοντες) gli enti geometrici, dicono che

> il punto [στιγμή] è un *segno* [σημεῖον] senza parti e senza estensione, o l'estremità di una linea.[20]

Poiché la frase "il punto è un *segno* senza parti" coincide quasi con la definizione 1 degli *Elementi* e la caratterizzazione del punto come estremità di una linea con la definizione 3, si è in genere pensato che Sesto in questo passo citasse Euclide. È però qui menzionata anche una terza proprietà del punto: la mancanza di estensione; inoltre nessuna delle tre è considerata una *definizione* (ὅρος); Sesto cita infatti frasi che "i matematici [dicono] descrivendo" (ὑπογράφοντες) gli enti geometrici, mentre quando aveva riportato la definizione di cerchio (che sappiamo essere probabilmente quella originale di Euclide, grazie alla testimonianza del papiro ercolanese già citato) Sesto Empirico si era riferito ai matematici "che definiscono" (ὁριζόμενοι) il cerchio.[21] Poiché negli *Elementi* vi sono molte definizioni, ma nessuna "descrizione", si può pensare che Sesto Empirico non alluda qui a Euclide ma a qualcun altro.

Non è difficile individuare il matematico realmente citato, poiché quella riferita da Sesto non è altro che l'inizio della prima delle *Definizioni di Erone*.[22] Erone, "descrivendo" (ὑπογράφων), come dice, gli enti geometrici, aveva iniziato con la frase:

> Il punto è ciò che non ha parti o un'estremità senza estensione o l'estremità di una linea.[23]

La frase di Erone comprende, quindi, non solo le due definizioni inserite negli *Elementi*, ma anche i due elementi che, co-

[20] στιγμὴν μὲν εἶναι σημεῖον ἀμερὲς καὶ ἀδιάστατον ἢ πέρας γραμμῆς... (Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, III, 20). Per i termini στιγμή e σημεῖον cfr. sopra, p. 72.

[21] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, III, 107.

[22] L'opera di Erone (pubblicata in [Heronis OO], vol. IV) ci è stata trasmessa da una raccolta bizantina nella quale il titolo *Definizioni di Erone* serviva a distinguere il testo che abbiamo (probabilmente estratto da un'opera maggiore) da brani estratti da altri autori. Sembra quindi improbabile che il titolo sia quello originale.

[23] σημεῖόν ἐστιν, οὗ μέρος οὐθὲν ἢ πέρας ἀδιάστατον ἢ πέρας γραμμῆς.

me abbiamo notato, differenziano la citazione di Sesto dal testo degli *Elementi*: l'uso del verbo *descrivere* (ὑπογράφειν) e la caratterizzazione del punto come ente privo di estensione. Sesto Empirico continua con le parole:

> la linea è lunghezza senza larghezza o il limite di una superficie, la superficie il limite di un corpo o larghezza senza profondità.

Mentre la definizione di superficie come limite del corpo è in Erone ma non è inclusa negli *Elementi*, le altre tre frasi citate sono presenti sia negli *Elementi* che in Erone. Anche discutendo il concetto di retta, Sesto Empirico riporta sia la definizione che appare anche negli *Elementi*[24] sia un'altra definizione (basata sull'invarianza della linea rispetto a rotazioni che mantengano fissi due punti) che manca negli *Elementi* ma è presente in Erone.[25] Possiamo concludere che quando Sesto riporta "descrizioni" di enti geometrici fondamentali la sua fonte sembra essere spesso non Euclide, ma Erone.[26]

Il passo seguente di Sesto è particolarmente importante:

> E giacché, se ci proponiamo di definire tutto, non definiremo nulla, rinviando all'infinito [ogni definizione], mentre se ammettiamo che alcune cose possano essere comprese senza definizione, stiamo dichiarando che le definizioni non sono necessarie per la comprensione [...] perciò o non definiremo nulla o dichiareremo le definizioni non necessarie.[27]

Questo brano mostra innanzitutto che la possibilità di partire da enti non definiti (che, come abbiamo visto, risaliva almeno ad Antistene) era presa ancora in considerazione all'epoca di Sesto Empirico (circa 200 d.C.). Difficilmente Sesto Empirico avrebbe potuto affrontare questo argomento senza prendere in considerazione gli *Elementi* di Euclide, l'opera cioè che, basata su delle definizioni, era alla base di tutti gli sviluppi matematici successivi. La scelta metodologica di Euclide deve quindi essere tra le possibilità prese in considerazione da Sesto Empirico. Poiché Euclide non aveva elencato infinite definizioni, né aveva rinunziato a formularne, il passo citato suggerisce che nella redazione degli *Elementi* nota a Sesto "si ammettesse che alcune

[24] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, III, 94.

[25] Sesto Empirico, *Adversus Mathematicos*, III, 98. Erone, *Definizioni*, def. 4.

[26] Osserviamo che questa possibilità non aveva potuto essere presa in considerazione da studiosi come Heiberg e Heath poiché essi (in mancanza della datazione di Erone fornita solo successivamente da Neugebauer) avevano ritenuto Erone posteriore a Sesto Empirico.

[27] Sesto Empirico, *Lineamenti del Pirronismo*, II, 207-208.

cose possano essere comprese senza definizione", cioè che in tale redazione alcuni enti fondamentali fossero lasciati indefiniti. Si capirebbe allora anche perché su questo argomento Sesto avesse dovuto usare Erone.

Le definizioni dei cinque enti geometrici fondamentali (punto, linea, retta, superficie e piano) date negli *Elementi* coincidono tutte con brani dell'opera di Erone. In particolare le definizioni di punto e di retta degli *Elementi* che abbiamo trascritto coincidono con le prime parole di quelle corrispondenti di Erone. Il nostro sospetto può quindi essere precisato congetturando che si tratti di un'interpolazione proveniente dall'opera di Erone.

Sappiamo, d'altra parte, sia da Proclo (V secolo d.C.) sia da fonti arabe, che Erone aveva scritto un commento divulgativo agli *Elementi*, del quale le *Definizioni* rimasteci potrebbero essere un estratto. L'inserimento di brani di Erone nel testo degli *Elementi*, durante i secoli nei quali l'opera di Euclide fu copiata, a fini didattici, insieme al commento di Erone, è non solo plausibile ma anche documentato: alcuni brani contenuti in tutti i manoscritti degli *Elementi* sono infatti identificati come interpolazioni provenienti dal commento di Erone da varie fonti. Alcuni di tali brani sono attribuiti a Erone dal commentatore arabo an-Nairīzī.[28] Altri brani sono attribuiti a Erone da Proclo ma non da an-Nairīzī.[29] La lunga "definizione" che Erone dà di linea retta è particolarmente interessante. Essa inizia con la frase:

> linea retta è [quella] che allo stesso modo rispetto a [tutti] i suoi punti giace dritta e tesa al massimo tra gli estremi.[30]

L'origine di questa caratterizzazione della retta sembra individuabile in Archimede (autore verso il quale Erone mostra sempre grande interesse). All'inizio dell'opera *Sulla sfera e sul cilindro*, Archimede aveva assunto, infatti, che tra le linee con le stesse estremità il segmento di retta avesse la minima lunghezza.[31] Erone, volendo usare il postulato archimedeo per caratterizzare la retta, non poteva limitarsi però a una coppia di punti, ma doveva aggiungere che la retta verifica la proprietà indivi-

[28] Ad esempio la proposizione 12 del III libro; cfr. [Heath: *Elementi*], vol. 2, pp. 28-29.

[29] Ad esempio una prova alternativa della prop. 25 del I libro; cfr. Proclo, *In primum Euclidis elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 346-347.

[30] εὐθεῖα μὲν οὖν γραμμή ἐστιν ἥτις ἐξ ἴσου τοῖς ἐπ' αὐτῆς σημείοις κεῖται ὀρθὴ οὖσα καὶ οἷον ἐπ'ἄκρον τεταμένη ἐπὶ τὰ πέρατα.

[31] Archimede, *Sulla sfera e sul cilindro*, I, 10, 23-25 (ed. Mugler). Quella di Archimede non era affatto una "definizione", ma il primo dei postulati dell'opera.

duata da Archimede "allo stesso modo rispetto a [tutti] i suoi punti", cioè ἐξ ἴσου τοῖς ἐπ' αὐτῆς σημείοις. La frase di Erone è quindi chiara. Osserviamo che anche per Plutarco la retta è caratterizzata dalla proprietà di essere la linea più breve tra due punti e non dalla definizione che troviamo oggi negli *Elementi*.[32]

Vista la difficoltà di memorizzare le lunghe illustrazioni di Erone e il tipo di insegnamento diffuso in epoca imperiale, si può immaginare che fossero state compilate, a uso degli sfortunati studenti, elenchi di forme abbreviate delle "definizioni" di Erone, ottenute troncandole non appena si potesse ottenerne una proposizione sintatticamente corretta. Elenchi del genere,[33] copiati insieme agli *Elementi*, avrebbero finito facilmente con il confondersi con il testo di Euclide. Il fatto che seguendo questo procedimento si ottengano proprio le definizioni inserite nel testo degli *Elementi*, compresa quella di retta ("linea retta è quella che allo stesso modo rispetto a [tutti] i suoi punti giace"), cui nessun matematico è mai riuscito a dare un senso compiuto, dimostra la plausibilità della congettura.

Proclo sembra conservare, attraverso canali non facilmente ricostruibili, un ricordo della relazione tra il postulato archimedeo e la definizione di retta degli *Elementi*. Egli si sforza infatti di mostrare, con strane argomentazioni delle quali non si è finora capita l'origine, che quella degli *Elementi* è solo una diversa formulazione della proprietà di minimo individuata da Archimede.[34]

Il punto e la linea sono definiti negli *Elementi* ciascuno due volte (il punto nelle definizioni 1 e 3 e la linea nelle definizioni 2 e 6), ma anche queste definizioni duplici, che costituiscono una chiara incongruenza logica, sono facilmente spiegabili accettandone la derivazione da Erone, che aveva illustrato i concetti di punto e linea elencandone molte diverse caratterizzazioni. È comprensibile infatti che il compilatore, dovendo decidere quali delle frasi di Erone conservare come "definizioni", in alcuni casi abbia potuto essere così indeciso da conservarne due.

Sorge un altro problema. Se Erone non trae le definizioni degli enti geometrici fondamentali dagli *Elementi*, quali sono state, su questo argomento, le sue fonti?

Gran parte dei concetti usati nella "definizione" 1 di Erone, che è in realtà una lunga illustrazione del concetto di punto, so-

[32] Plutarco, *Platonicae quaestiones*, 1003E; *De Pythiae oraculis*, 408F.

[33] Il papiro già ricordato (P. Mich. iii, 143) potrebbe esserne un tardo esempio.

[34] Proclo, *In primum Euclidis Elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), pp. 109-110.

no in Aristotele.[35] La caratterizzazione delle linee come estremità delle superfici, contenuta in un passo della definizione 2 di Erone (corrispondente alla definizione 6 degli *Elementi*) risale a Platone ed era stata già criticata da Aristotele (*Topica*, VI, 6, 143b, 11). In altri casi Erone può avere attinto a fonti successive a Euclide; ad esempio, come abbiamo visto, la "definizione" di linea retta sembra derivare da Archimede. In definitiva, anche prescindendo da Euclide, Erone avrebbe avuto certamente a disposizione tutto il materiale sufficiente per derivarne le sue illustrazioni degli enti geometrici fondamentali; la sua scelta delle fonti sarebbe stata peraltro coerente sia con il suo abituale eclettismo, sia con il risveglio di interesse per le opere di Platone e di Aristotele verificatosi dal I secolo a. C.

La più autorevole conferma alla nostra tesi viene da Erone stesso, che inizia la sua opera scrivendo:

> Descrivendo [ὑπογράφων] ed abbozzando per te, illustre Dionisio, con il massimo di concisione, i termini tecnici presupposti negli elementi di geometria [τὰ πρὸ τῆς γεωμετρικῆς στοιχειώσεως τεχνολογούμενα], assumerò come punto di partenza e come struttura generale l'insegnamento di Euclide, l'autore degli *Elementi* della teoria geometrica.[36]

La presentazione di Erone è chiara se si suppone che egli si fosse preoccupato in particolare di illustrare gli enti geometrici lasciati indefiniti da Euclide, cioè, appunto, "i termini tecnici presupposti negli elementi di geometria". Le parole di Erone non possono interpretarsi come riferentesi ai primi termini considerati nell'opera di Euclide, anche perché molte delle definizioni di Erone (a cominciare da alcune delle prime) riguardano enti non nominati negli *Elementi*. Il fatto che Erone consideri la propria opera preliminare agli *Elementi* fornisce inoltre un forte sostegno alla congettura che o egli stesso o editori successivi avessero fatto precedere il testo di Euclide da brani delle sue *Definizioni*.

La tesi qui sostenuta è in aperto contrasto con il platonismo tradizionalmente attribuito a Euclide. D'altra parte l'idea di un Euclide platonico trae origine, a mio parere, soprattutto da tre elementi: la persistente influenza dell'unico commento a Euclide conservato in greco, che è quello del filosofo neoplatonico Proclo; la presenza nel testo degli *Elementi* delle definizioni di cui ci stiamo occupando, di chiaro stampo platonico, e il credito

[35] Alcuni passi aristotelici su questo argomento: *Physica*, IV, 11, 220a, 15 sgg., dove si parla anche del punto come "estremità di una linea"; *Metaphysica*, V, 6, 1016b, 24-30, dove si insiste sulla indivisibilità che caratterizza il punto; *De caelo*, III, 1, 300a.

[36] [Heronis OO], vol. IV, p. 14.

alle interpretazioni platonizzanti di Euclide che è venuto dalla vitalità delle posizioni platoniche nelle scuole matematiche succedutesi dall'epoca imperiale a oggi.

È interessante notare che la conclusione cui siamo arrivati sembra essere stata già raggiunta implicitamente da Karl Popper, che ha scritto:

> Penso che la storia del pensiero da Aristotele in poi possa essere riassunta dicendo che ogni disciplina si è arrestata ad uno stadio di vuoto verbalismo e sterile scolasticismo finché ha usato il metodo aristotelico di definizione, e che il grado nel quale le varie scienze sono riuscite a compiere progressi è dipeso dal grado nel quale sono state capaci di sbarazzarsi di questo metodo essenzialista. [37]

Applicando la considerazione di Popper alla geometria e escludendo, come dobbiamo, che il metodo di Euclide (che è rimasto il modello di ogni metodo scientifico per più di due millenni) possa essere descritto come "vuoto verbalismo e sterile scolasticismo", dobbiamo dedurne che le definizioni di cui ci siamo occupati in questo paragrafo (che non sono solo metodologicamente platonico-aristoteliche, ma spesso risalgono a Platone o ad Aristotele anche nella loro formulazione letterale) non possono essere di Euclide. Abbastanza stranamente, Popper non trasse questa conclusione dalla sua acuta considerazione, ma si attenne all'idea tradizionale di un Euclide "platonico". [38]

9.2. *La misura di Eratostene del meridiano terrestre*

Eratostene, con il metodo che abbiamo ricordato nel §3.2, ottenne per la lunghezza del meridiano il valore di 252.000 stadi. Non è facile valutare la precisione di tale misura poiché il valore dello "stadio" usato è stato oggetto di lunghe controversie. Usando il valore di circa 185 m si ottiene un errore di quasi il 17%, mentre se, con la maggioranza degli studiosi, si accetta il valore di 157,5 m [39] si ottiene un errore di circa 0,8 %. Un er-

[37] [Popper OSE], vol. II, p.9.

[38] Cfr. [Popper OSE], vol. I, Addendum I. Poiché l'importanza scientifica degli *Elementi* non può ovviamente sfuggirgli, Popper deve dedurre dall'asserito platonismo di quest'opera (che egli argomenta, in particolare, servendosi di passi di Proclo) la conseguenza che Platone sia stato il "fondatore della scienza moderna". Poiché Popper ritiene che Platone sia anche stato il fondatore del metodo essenzialista usato nelle definizioni aristoteliche, l'ultima affermazione è difficilmente conciliabile con il passo citato nel testo.

[39] Questo valore dello stadio usato da Eratostene, che sarebbe diverso dallo stadio tradizionale usato in Grecia, fu determinato in [Hultsch GRM] ed è stato accettato dalla maggioranza degli studiosi successivi. La determinazione

rore così piccolo è stato però considerato sempre con molto sospetto, soprattutto perché le assunzioni che Siene e Alessandria siano sullo stesso meridiano e che Siene sia sul tropico sono entrambe una grossolana approssimazione. Inoltre, mentre le misure moderne furono basate su triangolazioni effettuate su distanze dell'ordine del centinaio di chilometri,[40] si assume in genere che la distanza tra Siene e Alessandria fosse stata valutata contando giornate di viaggio. La conclusione generalmente accettata è che l'ottimo risultato di Eratostene sia il frutto di una casuale compensazione di errori.[41]

Quella del grado di meridiano non è l'unica misura di distanza attribuita a Eratostene, che aveva realizzato una carta geografica di tutto il mondo conosciuto. Uno dei dati riportati da Strabone è la distanza tra Alessandria e Rodi, che Eratostene avrebbe determinato in 3750 stadi.[42] Anche questo valore viene in genere considerato una rozza stima.[43]

Prima di affrontare il problema del valore dello stadio, cominciamo con il valutare non la precisione delle misure di distanza di Eratostene, ma quella del loro rapporto, che è ovviamente indipendente dal valore dello stadio. Assumendo cioè come *ipotesi* che il grado di meridiano misuri 700 stadi (usando, in altre parole, questo dato come definizione dello stadio) possiamo calcolare la distanza in stadi tra Alessandria e Rodi e confrontare il risultato con quello di Eratostene. In questo modo è possibile valutare almeno la precisione delle misure angolari.

Con calcoli elementari, usando i dati forniti dalle carte moderne, si ottiene per la distanza tra Alessandria e Rodi un valore di circa 3770 stadi.[44] La differenza tra il valore così otte-

si basa soprattutto su un passo di Plinio (*Naturalis historia*, XII, 53) dove per il rapporto tra stadio e scheno si danno due valori alternativi e uno dei due è introdotto con le parole "secondo il rapporto di Eratostene" (*Eratosthenis ratione*). Per l'opinione che Eratostene avrebbe usato lo stadio tradizionale, di circa 185 m, cfr. [Rawlins ESNM].

[40] La prima misura moderna fu tentata nel 1606 da W. Snell con una triangolazione nella pianura olandese. Dopo altri tentativi basati su distanze insufficienti, finalmente nel 1669 l'Accademia di Francia organizzò la misura di una distanza di circa 112 km, che fornì il primo valore attendibile del grado di meridiano, che, tradotto in metri, fu di 111 km e 715 m (con un errore, quindi, dello 0,54 %). Cfr. [Taylor], pp. 555 e 564.

[41] Cfr. [Heath, HGM], vol. II, p. 107; [Neugebauer HAMA], p. 653.

[42] Strabone, *Geografia*, II, v, 24.

[43] Cfr., ad esempio, [Neugebauer HAMA], p. 653.

[44] Dette φ_1 e φ_2 le latitudini di Alessandria e di Rodi e $\Delta\varphi$ e $\Delta\psi$ le differenze di latitudine e di longitudine, la distanza in stadi (definiti come 1/700 del grado di meridiano) tra Alessandria e Rodi è: $D = 700 \arccos [\cos\Delta\varphi - (1 - \cos\Delta\psi) \cos\Delta\varphi_1 \cos\Delta\varphi_2]$ (dove il coseno si intende definito sulle misure in gradi degli angoli). Con l'approssimazione di un primo si ha $\varphi_1 = 31° 13'$; $\varphi_2 = 36° 26'$; $\Delta\psi = 5° 13'$; $\Delta\varphi = 1° 36'$. Le coordinate usate corrispondono per Alessandria

nuto e quello di Eratostene corrisponde a un errore di circa 0,5%. Non possiamo dire che questo sia stato effettivamente l'errore di Eratostene, poiché si tratta di un errore dello stesso ordine di grandezza dell'approssimazione con cui abbiamo determinato le coordinate dei due porti e nel caso di Rodi non possiamo sapere il punto di riferimento usato con una precisione maggiore.

Osserviamo che assumendo (come si assumeva in età imperiale) che Alessandria e Rodi fossero sullo stesso meridiano e basandosi quindi solo sulla differenza di latitudine, si sarebbe ottenuto per la distanza il valore di (5 x 700 + 13 x 700/60) ~ 3652 stadi, con un errore superiore al 3%, mentre l'errore di Eratostene sembra inferiore di quasi un ordine di grandezza. La congettura che fosse stata valutata in qualche modo anche la differenza di longitudine ne viene rafforzata.

Le grossolane approssimazioni sempre attribuite a Eratostene, consistenti nel supporre Alessandria e Siene sullo stesso meridiano e Siene esattamente sul tropico, sembrano difficilmente compatibili con la precisione che abbiamo verificato. La principale fonte di tali notizie, Cleomede, aveva in realtà scritto:

> Il metodo di Eratostene, essendo geometrico, appare più oscuro [di quello di Posidonio esposto precedentemente]. Ciò che egli dice diventerà però chiaro se noi premettiamo le seguenti assunzioni: assumiamo innanzitutto che Alessandria e Siene siano sullo stesso meridiano.[45]

Quello di Cleomede non è un resoconto dettagliato (che, d'altra parte, non avrebbe avuto senso, essendo ancora disponibile l'opera di Eratostene), ma uno scritto didattico, rivolto ai lettori spaventati dai complessi argomenti geometrici contenuti nell'opera originale. Cleomede raggiunge lo scopo di spiegare il principio del metodo usato da Eratostene considerando un caso ideale, ottenuto eliminando tutte le difficoltà tecniche. Non si capirebbe del resto come avrebbe potuto altrimenti condensare in tre paginette l'opera di Eratostene in due libri. Cleomede arrotonda anche le cifre, evidentemente per non infastidire il lettore con calcoli inessenziali ai fini della comprensione del metodo.[46]

alla posizione del Faro e per Rodi alla parte orientale del porto, che è quella avvistabile da navi provenienti da Alessandria. Ho usato le carte nautiche dell'Ammiragliato britannico (Admiralty Publications, charts N.1667, 2681).

[45] Cleomede, *Caelestia*, I, 7, 49-52 (ed. Todd).

[46] Sia il valore di Cleomede della circonferenza terrestre (250.000 stadi, invece dei 252.000 riportati da tutte le altre fonti) sia la differenza di latitudine

Cleomede riferisce che a mezzogiorno del solstizio d'estate le meridiane non davano ombra entro una fascia della larghezza di 300 stadi attorno al tropico.[47] Dobbiamo dedurne che le misure con meridiane solari erano state molte, in una vasta zona, e il tropico era stato determinato come la linea mediana della fascia senza ombra.[48] Poiché Siene dista dal tropico più di 400 stadi, difficilmente questa città avrebbe potuto essere considerata al centro di una fascia alla quale era largamente esterna. D'altra parte, volendo indicare un nome di città, non si sarebbe potuto nominare che Siene, che era la città dell'Egitto più vicina al tropico e la base naturale di ogni spedizione al tropico.[49]

Il particolare riferito da Cleomede suggerisce una digressione su una importante questione relativa al metodo sperimentale. Secondo un'opinione molto diffusa, gli scienziati ellenistici ignoravano il procedimento di media aritmetica di molte misure.[50] Tale opinione è basata sull'assenza di fonti che documentino direttamente l'uso di tale procedimento. Osserviamo però che l'individuazione del tropico come linea mediana della "fascia senza ombra", implicata logicamente dall'affermazione di Cleomede, sembra essere un caso in cui la letteratura conserva la traccia indiretta dell'uso di tale metodo. D'altra parte la mancanza di testimonianze dirette su questo argomento non può stupire, visto che la tradizione manoscritta non ha conservato né le opere in cui avrebbero potuto essere usati procedimenti analoghi (ad esempio i lavori sperimentali di Erofilo sulle pulsazioni) né l'opera teorica di Eratostene che potrebbe

tra Alessandria e Siene (considerata pari a 1/50 di giro) sono valori evidentemente arrotondati, come è naturale da parte di chi vuole solo illustrare "il metodo", come afferma Cleomede. Stranamente sembra che molti studiosi non se ne siano accorti, anche perché traducono i dati di Cleomede in altre unità (o li leggono già tradotti). Ad esempio per J. Dutka la misura riferita da Cleomede non è che "the equivalent of 7°12'" ([Dutka]). In realtà non è affatto equivalente parlare di 1/50 di giro o di 7° 12', in quanto la seconda espressione ha senso solo se si usa la precisione di 1'.

[47] Cleomede, *Caelestia*, I, 7, 101-102 (ed. Todd).

[48] L'osservazione che l'informazione riferita da Cleomede poteva essere stata raccolta solo da personale inviato allo scopo di effettuare le misure è già in [Hultsch PGES], p. 14. J. Dutka obietta che "it is questionable whether in that era royal surveyors would be used for a purely scientific purpose" ([Dutka]). Si può sospettare che la politica scientifica dei primi Tolomei fosse più nota ai filologi classici tedeschi della fine dell'Ottocento che agli ingegneri americani contemporanei, ai quali quella di Eratostene rischia di apparire una qualsiasi epoca del lontano passato.

[49] Siene (che è considerata sul tropico anche da Strabone, Plinio e Arriano) è infatti presso la prima cataratta, che segnava il confine, lungo il Nilo, tra Egitto ed Etiopia, nella quale occorreva inoltrarsi per raggiungere il tropico.

[50] Cfr., ad esempio, [Grasshoff], p. 203, dove si ricorda che i primi esempi documentati di procedimenti di media di risultati sperimentali risalgono agli astronomi islamici di Baghdad del IX secolo.

forse fornire qualche informazione su questo argomento: il trattato *Sulle medie.*[51]

Se il tropico fu individuato come la linea media di una zona ampia 300 stadi, è plausibile che potesse essere determinato con una precisione dell'ordine di alcune decine di stadi, cioè di alcuni primi.

Quanto alla notizia del pozzo di Siene, il cui fondo era illuminato dal sole a mezzogiorno del solstizio d'estate, Plinio in realtà dice che il pozzo era stato scavato a scopo dimostrativo.[52]

Strabone afferma che la misura di Eratostene della distanza Alessandria-Rodi era basata su misure effettuate con meridiane solari. Per due località con la stessa longitudine, dalla differenza di latitudine, misurabile con meridiane solari, si può in effetti ricavare facilmente la distanza assoluta, purché si conoscano le dimensioni della Terra. Eratostene si basava evidentemente anche sulla propria misura del grado di meridiano, che era stata presumibilmente effettuata proprio per permettere di misurare distanze (lungo i meridiani) con meridiane solari.

Vi è però una difficoltà: Rodi e Alessandria non sono sullo stesso meridiano; come valutare il contributo alla distanza dovuto alla differenza di longitudine? Per questo è sufficiente conoscere l'angolo medio che la rotta Rodi-Alessandria forma con il meridiano. Strabone riferisce che Eratostene aveva confrontato la sua misura di 3750 stadi con precedenti stime di marinai. Eratostene aveva quindi preso in considerazione dati forniti da marinai; possiamo supporre che tra questi dati vi fosse una stima della direzione della rotta tra i due porti.[53] Non è facile misurare con precisione l'angolo della rotta Alessandria-Rodi; il valore ottenuto per la distanza non è però troppo sensibile all'errore su tale angolo: l'errore che abbiamo ipotizzato sulla distanza, inferiore all' 1%, è compatibile infatti con un errore sul rapporto $\Delta\psi/\Delta\varphi$ (vedi sopra, n. 44) dell'ordine del 10%.

Eratostene aveva usato la propria misura del meridiano, basata sulla valutazione della distanza tra Alessandria e Siene, per calcolare, sulla base di ulteriori misure, la distanza tra

[51] Sappiamo il titolo di quest'opera da Pappo, *Collezione*, VII, 636, 24-25 (ed. Hultsch). L'unica altra informazione sul trattato è quella deducibile da un altro passo di Pappo (*Collezione*, VII, 662, 15-18) in cui, con apparente riferimento alla stessa opera, si afferma che Eratostene aveva discusso di "luoghi geometrici relativi a medie" e che tali luoghi geometrici, per la peculiarità della loro definizione, non rientravano nella classificazione di Apollonio.

[52] Plinio, *Naturalis historia*, II, 183.

[53] La congettura che Eratostene avesse stimato la differenza di longitudine sulla base di informazioni sulla direzione della rotta è coerente con la critica rivoltagli da Ipparco di non avere usato a questo scopo metodi astronomici (Strabone, *Geografia*, I, i, 12).

Alessandria e Rodi. Poiché la rotta Alessandria-Rodi è percorribile in linea retta ed era la più frequentata del mondo ellenistico, le informazioni fornite direttamente dai marinai sulla lunghezza della rotta non erano meno attendibili di quelle ottenibili valutando la durata del viaggio Alessandria-Siene. Se Eratostene usò questa seconda distanza come base del suo complesso calcolo, si deve quindi pensare che essa fosse stata realmente misurata.

Un ricordo del lavoro occorrente per il rilevamento topografico è rimasto nelle fonti. Marziano Capella scrive infatti che le misure di distanza sulle quali era basata la misura delle dimensioni della Terra erano state fornite a Eratostene dai "*mensores regii*"[54] e alcune informazioni sulla carta dell'Egitto realizzata da Eratostene sono riferite da Strabone.[55] Sappiamo che sin dall'epoca faraonica una minuziosa misura della terra (γεωμετρία) era rinnovata ogni anno in tutto l'Egitto. In epoca tolemaica le misure erano affidate a funzionari tecnici e controllori regi in ogni singolo villaggio; esse erano poi raccolte e coordinate dai "toparchi" per ogni "topo" (suddivisione del "nomo") e successivamente dai "nomarchi" per ogni provincia (o "nomo"). I rapporti giungevano infine ad Alessandria, dove erano usati per la preparazione dei ruoli di tassazione.[56] Combinando questa capillare organizzazione burocratica con i metodi della nuova topografia scientifica non doveva essere stato impossibile realizzare buone carte dell'Egitto.

In definitiva non sembra che si possa scartare l'ipotesi che la misura di Eratostene del meridiano avesse realmente un errore inferiore all'1%, cioè dello stesso ordine di grandezza di quello della misura effettuata nel 1669.

È stato osservato che la misura del meridiano ottenuta da Eratostene, 252.000 stadi, ha la proprietà di essere divisibile per tutti numeri naturali da 1 a 10 (il loro minimo comune multiplo è infatti 2520). Si tratta naturalmente di una proprietà molto utile ed è improbabile che sia frutto del caso. Eratostene potrebbe avere alterato i dati per ottenere un valore così comodo.[57] Il passo di Plinio sul valore dello stadio "secondo il rapporto di Eratostene", può però suggerire anche un'altra possibilità: quella che Eratostene avesse introdotto il nuovo "stadio"

[54] Marziano Capella, *De nuptiis Mercurii et Philologiae*, VI, 598.

[55] Strabone, *Geografia*, XVII, i, 2. I dati riportati da Strabone sono però giunti in forma corrotta; una ricostruzione di almeno alcuni dei dati originali è in [Rawlins ESNM].

[56] Per l'organizzazione del catasto e le misure della terra in epoca tolemaica cfr. [Rostovzev SESME], vol. I, pp. 283-284.

[57] È questa l'opinione di Rawlins, che ha notato le particolari proprietà di divisibilità del valore 252.000 in [Rawlins ESNM],

proprio come un conveniente sottomultiplo del meridiano, anticipando il procedimento usato in epoca moderna per definire il metro. In un caso parzialmente analogo Eratostene aveva scelto una nuova e conveniente unità di misura: dobbiamo infatti a lui il sistema di cronologia basato sulle Olimpiadi.

La misura del meridiano terrestre, necessaria per la realizzazione di carte geografiche e, soprattutto, nautiche, era stata probabilmente un'impresa scientifica finanziata dallo stato con una larghezza simile a quella usata per altre opere utili alla navigazione, come il Faro e il Canale. La direzione generale del lavoro e il merito di averlo portato a termine erano stati forse attribuiti a Eratostene in quanto bibliotecario di Alessandria, cioè massimo responsabile della politica scientifica statale.

Nel §3.3 ci eravamo chiesti come mai Marino di Tiro e Tolomeo, pur conoscendo il metodo usato da Eratostene, non avessero ripetuto la misura del meridiano, accontentandosi di reinterpretare (sbagliando) gli antichi dati. Accettando le conclusioni precedenti la risposta diviene chiara: evidentemente perché, potendo ancora leggere l'opera di Eratostene, essi sapevano che egli si era basato su un complesso lavoro di rilievo topografico non più realizzabile nelle nuove condizioni politiche.

Gli scrittori di epoche successive, in cui si era perso anche il ricordo della possibilità di progetti scientifici finanziati dallo stato, hanno trasmesso il ricordo di una "geniale" idea isolata di Eratostene. Non è accaduto lo stesso, del resto, anche per l'idrostatica di Archimede?

La misura della Terra del 1669 era basata su tre elementi: la geografia matematica, metodi di triangolazione topografica e strumenti per il rilevamento quali i teodoliti. Risalgono al primo ellenismo certamente i primi due elementi e con ogni probabilità anche il terzo. [58] Per effettuare una misura accurata di grandi distanze occorre però anche una elevata capacità di organizzazione del lavoro, che spesso consideriamo una prerogativa della civiltà moderna. Ricordiamo che nel 1669 si era ben lontani dal poter scavare un canale dal Mediterraneo al Mar Rosso. Per questo sarebbero occorsi ancora due secoli e una capacità organizzativa ben maggiore di quella che poteva assicurare l'Accademia di Francia nel XVII secolo. I Tolomei lo avevano fatto qualche decennio prima della misura di Eratostene.

[58] I moderni teodoliti furono costruiti per la prima volta nel XVI secolo seguendo le indicazioni date da Erone per la costruzione della diottra (che da allora è considerata l' "antenato" del teodolite). Per la congettura che anche la diottra di Erone risalga al primo ellenismo, cfr. sopra, pp. 146-147.

9.3. *Il principio di inerzia*

L'esperienza comune mostra che per spostare dei gravi su un piano orizzontale occorre esercitare una forza; questa constatazione è compatibile con il principio di inerzia se, e solo se, tra le forze possibili si includono gli attriti; il concetto di attrito è quindi inscindibilmente legato alla formulazione del principio di inerzia.

Anche se almeno un precedente prescientifico (cioè non formalizzato in una "teoria scientifica") del principio di inerzia è certamente presente in Democrito,[59] si ritiene in genere che sia il principio di inerzia sia l'idea di attrito fossero ignoti nell' "Antichità". Erone, nella *Meccanica*, usa però chiaramente il concetto di attrito[60] e afferma:

> Dimostreremo che i pesi in una tale posizione [posti cioè su un piano orizzontale privo di attrito] possono essere mossi da una forza minore di qualsiasi forza data.[61]

L'enunciato è dimostrato da Erone approssimando indefinitamente il piano orizzontale con piani inclinati con inclinazioni sempre minori.

La *Meccanica* di Erone ha molti punti di contatto con i *Problemi meccanici* pseudo-aristotelici. In particolare le due opere contengono delle esposizioni della regola del parallelogramma per la composizione degli spostamenti così simili tra loro da far supporre una fonte comune.[62] Nei *Problemi meccanici*, subito dopo avere esposto la regola del parallelogramma, si osserva che un punto che si muove di moto circolare uniforme è sottoposto contemporaneamente a due spostamenti: uno, "secondo natura (κατὰ φύσιν)", lungo la tangente e l'altro, "contro natura (παρὰ φύσιν)", diretto verso il centro.[63] Questa terminologia fa pensare che nella fonte del compilatore dei *Problemi meccanici* solo moti rettilinei potessero essere "secondo natura".

[59] Democrito attribuisce infatti agli atomi un moto eterno privo di cause (cfr. Cicerone, *De finibus*, I, 6, 17). Lo storico della filosofia Zeller, alla metà del XIX secolo, non avendo assimilato il principio di inerzia, non riuscì a capire l'idea di Democrito. L'enorme influenza di Zeller sulla storiografia successiva ha protratto l'incomprensione. La questione è spiegata chiaramente in [Enriques de Santillana], pp. 147-150.

[60] Erone, *Meccanica*, I, iv, 20-21.

[61] Erone, *Meccanica*, I, iv, 20. Ho usato la traduzione francese del testo arabo della *Meccanica* (il cui originale greco è perduto) pubblicata in [Carra de Vaux: Erone, Mecc.].

[62] Erone, *Meccanica*, I, viii; pseudo-Aristotele, *Problemi meccanici*, 848b, 14-30.

[63] Pseudo-Aristotele, *Problemi meccanici*, 849a, 14-17.

Il testo dell'opera pseudo-aristotelica appare purtroppo corrotto e l'analisi quantitativa non sempre è chiara.

Poiché a volte si pensa che gli "Antichi" ignorassero l'accelerazione di gravità, va ricordato che l'accelerazione dei gravi in caduta era stata già riconosciuta da Aristotele e che decisivi progressi sull'argomento erano stati compiuti da Stratone di Lampsaco, come sappiamo da Simplicio.[64] Stratone aveva osservato, in particolare, che l'accelerazione è facilmente dimostrabile (e anche visualizzabile) nel caso dei fili d'acqua in caduta libera, i quali, dopo avere percorso un certo tratto, si spezzano in gocce. Purtroppo Simplicio non riporta l'argomento usato da Stratone per dedurre l'aumento di velocità dalla formazione delle gocce. Dal punto di vista della fisica moderna lo spezzarsi in gocce dipende dal restringersi della sezione della colonna liquida al di sotto di un valore critico e la diminuzione della sezione (essendo evidentemente costante il flusso) è appunto equivalente all'aumento della velocità, come affermato da Stratone.[65]

Plutarco, nel *De facie quae in orbe lunae apparet*, scrive[66] :

> Certo la luna è trattenuta dal cadere dallo stesso moto e dalla rapidità della sua rotazione, proprio come gli oggetti posti nelle fionde sono trattenuti dal cadere dal moto circolare. Il moto secondo natura guida infatti ogni corpo, se non è deviato da qualcos'altro. Perciò la luna non segue il suo peso, [che è] equilibrato dall'effetto della rotazione. Ma si avrebbe forse più ragione di meravigliarsi se essa restasse assolutamente immobile e fissa come la terra.[67] [...]
> Non bisogna dare ascolto ai filosofi se vogliono respingere paradossi con paradossi e, combattendo le stranezze di alcune dottrine, ne inventano di ancora più strane e stravaganti, come costoro che introducono la spinta verso il centro. Quale paradosso vi manca? [...] Non che massi incandescenti del peso di mille talenti spinti attraverso le profondità della terra, qualora giungessero al centro si

[64] Cfr. Simplicio, *In Aristot. phys.*, [CAG], vol. X, 916, 12-27.

[65] È probabile che Stratone, oltre al formarsi delle gocce, avesse notato anche la diminuzione della sezione (che non può sfuggire a chi osservi con qualche attenzione un filo d'acqua in caduta) e che avesse collegato i due effetti. La congettura che la spiegazione di Stratone fosse simile alla spiegazione "moderna" riportata nel testo appare plausibile, soprattutto se si tiene conto che il concetto di flusso, su cui è basata, è usato, in modo del tutto analogo, da Erone nella *Pneumatica* (opera della quale Stratone è certamente una delle principali fonti; cfr. sopra, pp. 98 e 146). D'altra parte la relazione tra la formazione delle gocce e l'accelerazione, sostenuta da Stratone, sembra oscura in assenza dei concetti teorici appena accennati, come è mostrato dai moderni storici della filosofia, che in genere non sono riusciti a capire l'argomento di Stratone (cfr., ad esempio, [Rodier], p. 64, n. 2).

[66] In questo paragrafo ho usato liberamente [Russo 2], che contiene anche alcune osservazioni sul testo sul quale è basata la traduzione seguente.

[67] Plutarco, *De facie...*, 923 C-D.

fermerebbero, senza incontrare nulla cui appoggiarsi, e se, spinti verso il basso con velocità, superassero il centro, si volgerebbero di nuovo indietro e andrebbero su e giù tra questi [punti di svolta]? [...] Non che una corrente impetuosa d'acqua spinta verso il basso, se giungesse al punto centrale, che essi stessi dicono incorporeo,[68] starebbe ferma sospesa, girerebbe in cerchio, oscillando con una incessante e perpetua oscillazione?[69]

Plutarco afferma: "il moto secondo natura guida ogni corpo, se non è deviato da qualcos'altro". Per chiarire il senso di questa frase dobbiamo innanzitutto chiederci cosa si intenda qui per moti "secondo natura" (κατὰ φύσιν). Per Aristotele (che discute a lungo la questione, in particolare nel *De caelo*) la risposta dipende dalla natura del corpo mobile: per i corpi pesanti il moto "secondo natura" è quello verso il basso (cioè verso il centro della Terra), per i corpi leggeri è invece "secondo natura" il moto verso l'alto, mentre i corpi celesti si muovono "secondo natura" di moto circolare.

Nel caso del sasso legato alla fionda il passo di Plutarco può suggerire che, come per Aristotele, il "moto secondo natura" sia quello diretto verso il basso, dovuto al peso, che avrebbe luogo in assenza del moto rotatorio. La distanza tra Aristotele e la fonte di Plutarco risulta però chiaramente dal fatto che la stessa considerazione è estesa alla Luna: evidentemente per la fonte di Plutarco la Luna e i sassi avevano gli stessi "moti secondo natura" e tra essi non vi erano i moti circolari uniformi. L'ultimo punto è di grande importanza, perché l'idea che i moti circolari uniformi siano quelli "naturali" dei corpi celesti non solo è in genere attribuita a tutta l'Antichità,[70] ma era ancora condivisa da Galileo.

L'espressione di Plutarco tradotta "moto secondo natura" è κατὰ φύσιν κίνησις, mentre l'effetto della gravità non è descritto come un "moto" (κίνησις) verso il centro della Terra, ma come una "spinta" (φορά) verso il centro. Non possiamo tradurre φορά con *moto*, perché i moti descritti da Plutarco come soggetti alla φορά verso il centro non sono diretti in genere verso il centro[71]: nel caso del masso di mille talenti che, arrivando con velocità al centro della Terra, lo supera iniziando a oscillare è chiaro che l'effetto della gravità (cioè della "spinta verso il centro",

[68] L'osservazione che è assurdo che un "punto" incorporeo possa esercitare un'influenza su dei corpi è tipica delle critiche scettiche alle teorie scientifiche. Cfr. ad esempio, Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, IX, 99, oppure il passo di Sesto Empirico citato a p. 223 (*Adversus Mathematicos*, I, 28).

[69] Plutarco, *De facie...*, 923F-924C.

[70] Ad esempio in [Koyré SG] sin dall'introduzione si afferma che il principio di inerzia era sconosciuto all' "Antichità" e che il moto circolare comincia a non essere considerato "secondo natura" solo nell'età moderna.

[71] Ciononostante la traduzione usuale è *moto*. Cfr. [Cherniss], dove si traduce *motion*.

ἐπὶ τὸ μέσον φορά) è il rallentamento del moto quando il masso si allontana dal centro e l'aumento della velocità quando vi si avvicina; le stesse considerazioni si applicano al caso del corso d'acqua in perpetua oscillazione. La stessa "spinta verso il centro" può avere l'effetto di mutare le velocità solo in direzione, dando luogo a un moto circolare uniforme, come mostrato sia nel caso del corso d'acqua sia in quello della Luna. In tutti i casi la φορά verso il centro corrisponde, in termini moderni, a una accelerazione con tale direzione. Sembra quindi che per moto "secondo natura" la fonte di Plutarco (come del resto lo pseudo-Aristotele dei *Problemi meccanici*) intendesse un moto rettilineo uniforme e che la sua dinamica fosse quindi basata sul principio d'inerzia.

Una teoria scientifica basata sul principio di inerzia deve ammettere che la stessa gravità sia compatibile con diversi moti (a seconda delle diverse velocità iniziali). Plutarco, nel caso dell'acqua presso il centro della Terra, elenca effettivamente tre moti possibili per lo stesso corpo sottoposto alla stessa φορά (verso il centro): la quiete, il moto circolare uniforme attorno al centro e l'oscillazione perpetua attraverso il centro. Come oggi sappiamo, si tratta effettivamente di tre moti possibili per un corpo nelle condizioni considerate da Plutarco. Anche nel caso del masso Plutarco aveva indicato non uno ma due moti possibili: la quiete e l'oscillazione.

Tutto il brano di Plutarco suggerisce che la sua fonte esponesse una dinamica basata sul principio di inerzia e sull'idea che ciò che oggi diciamo una "forza" (in particolare la gravità) non determini univocamente il moto, ma solo le variazioni di velocità. È quindi molto interessante per la storia della scienza cercare la fonte dalla quale Plutarco poteva aver tratto la sua esposizione.

Il personaggio del *De facie...* che deride la teoria per i suoi "paradossi", Lampria, rivolgendosi ad Apollonide (che nel dialogo rappresenta i "matematici"), afferma che la teoria delle deviazioni dei raggi visuali è al di là della sua portata e anche di quella di Ipparco.[72] Il fatto che Ipparco sia individuato come il principale avversario nel corso della stessa polemica antiscientifica cui appartengono le osservazioni sui "paradossi" della teoria che ci interessa può suggerire la congettura che su tale teoria la fonte di Plutarco fosse Ipparco. Tale congettura è resa plausibile dai seguenti elementi:

Plutarco nel *De facie...* mostra di conoscere effettivamente alcuni risultati di Ipparco: in particolare egli accenna alla possibilità di misurare la parallasse lunare (osservazione che sappia-

[72] Plutarco, *De facie...* , 921D.

mo risalire a Ipparco[73]) e usa dati numerici contenuti nelle tavole lunari di Ipparco.[74]

La datazione della teoria riferita da Plutarco all'epoca di Ipparco (seconda metà del II secolo a.C.) è coerente con la circostanza che essa sia ignota sia a Filone di Bisanzio (fine del III secolo a.C.)[75] sia a molti studiosi alessandrini di epoca imperiale (la teoria non avrebbe potuto, infatti, essere assimilata dalla tradizione scientifica alessandrina prima dell'interruzione dell'attività scientifica ad Alessandria del 145-144 a.C.).

La teoria aveva unificato lo studio del moto dei gravi con quello di corpi celesti come la Luna, studiandoli entrambi come casi particolari di moti di corpi soggetti a una "spinta verso il centro" (ἐπὶ τὸ μέσον φορά). Un grande astronomo come Ipparco, con interessi ben documentati per la Luna e attivo a Rodi, cioè proprio in quello che era stato il principale centro di studi di balistica,[76] appare un candidato naturale per la realizzazione di una simile unificazione.

La teoria sembra nota a Erone, che anche su altri argomenti, e in particolare a proposito della diottra,[77] fa sospettare di conoscere opere di Ipparco ignote ad altri studiosi alessandrini. La particolare conoscenza da parte di Erone di opere di Ipparco potrebbe non essere indipendente dalla sua ben nota familiarità con tradizioni scientifiche mesopotamiche. Poiché sappiamo delle relazioni sia commerciali che scientifiche tra Rodi e il vicino regno dei Seleucidi,[78] si può pensare infatti che le opere di Ipparco successive ai tragici avvenimenti del 145-144 avessero potuto conservarsi in Oriente meglio che in Egitto.

Elementi a mio parere decisivi sono forniti da Simplicio, il quale ci informa che Ipparco aveva scritto un'opera sulla gravità, dal titolo *Sui corpi "spinti" verso il basso a causa della gravità* (Περὶ τῶν διὰ βαρύτητα κάτω φερομένων).[79] Plutarco parla più volte nei termini riferiti da Simplicio: i massi, il fiume e altri corpi sono citati da Plutarco come corpi "spinti verso il basso

[73] Cfr. Tolomeo, *Almagesto*, V, v, 369. Come notato da Neugebauer, Plutarco osserva che la parallasse della Luna non è trascurabile subito prima di nominare Ipparco. Il passo sulla parallasse lunare era stato mal tradotto da Cherniss e il senso della frase è stato chiarito in [Neugebauer, HAMA], p. 661.

[74] Cfr. [Torraca].

[75] Nei *Belopoiika* di Filone di Bisanzio (della fine del III secolo a.C.), dove si discute a lungo del moto dei gravi, non è rintracciabile infatti alcun riferimento al principio di inerzia.

[76] Cfr. Filone di Bisanzio, *Belopoiika*, 108 (ed. Marsden).

[77] Cfr. sopra, pp. 146-147.

[78] È ben noto l'uso sistematico di dati astronomici mesopotamici da parte di Ipparco.

[79] Simplicio, *In Arist. de cael.* [CAG], vol. VII, p. 264, 25-26. La circostanza che l'opera di Ipparco, sconosciuta a molti studiosi alessandrini, fosse nota a

Strabone, nella *Geografia*, si riferisce certamente alla forma della Terra quando dice di assumere come "ipotesi" che la Terra abbia la forma di uno "sferoide" (σφαιροιδής).[87] Il termine usato da Strabone è interpretato in genere come sinonimo di sfera. È questa l'interpretazione di H.L. Jones che, per eliminare ogni dubbio nel lettore, ricorda come la forma ellissoidale della Terra "in senso moderno" non sia stata sospettata prima del XVII secolo.[88] L'uso di Strabone del termine è certamente compatibile con questa interpretazione. Strabone stesso afferma però di attingere la sua *ipotesi* ai trattati scientifici sull'argomento; non si può quindi escludere che il termine σφαιροιδής vi fosse usato nel suo significato scientifico, che è quello di ellissoide di rotazione.[89] Il dubbio che nelle fonti di Strabone si parlasse della forma ellissoidale della Terra può essere suggerito anche da un passo di Diodoro Siculo (che presumibilmente disponeva su questo argomento delle stesse fonti di Strabone), in cui è scritto che la Terra, ancora fluida, acquistò la sua forma comprimendosi per l'azione della gravità e ruotando incessantemente.[90]

La forma sferoidale della Terra "in senso moderno" è stata "sospettata" dai geografi, come ricorda Jones, nel Seicento. È interessante notare che tale sospetto precedette sia la misura dello schiacciamento polare sia la sua spiegazione teorica; non poté quindi essere originato né da dati sperimentali né da argomenti teorici, come è mostrato anche dal fatto che si discusse a lungo se la Terra fosse un ellissoide di rotazione con l'asse terrestre corrispondente all'asse minore o all'asse maggiore.[91] Cosa, allora, aveva potuto far sospettare la forma ellissoidale della Terra? Non potrebbe essersi trattato del grande interesse che i geografi del Seicento nutrivano per la *Geografia* di Strabone e le *ipotesi* in essa riferite?

[87] Strabone, *Geografia*, II, v, 5. Lo stesso termine è usato anche in *Geografia*, I, i, 20.

[88] [Jones H.], vol. I, p. 40, n. 2.

[89] Ricordiamo che l'uso della parola σφαιροιδής per indicare ellissoidi di rotazione era stato consacrato dall'opera di Archimede su questo argomento (*Sui conoidi e gli sferoidi*). Il "senso antico" della parola è quindi del tutto chiaro.

[90] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, I, vii, 2. Si può osservare che quando Archimede (nel I libro del trattato *Sui galleggianti*) dimostra che la forma sferica degli oceani è una conseguenza della gravità precisa che ciò è vero "in condizioni di riposo".

[91] La seconda opinione fu ancora sostenuta dal famoso Giacomo Cassini (1677-1756).

9.5. *Tolomeo e l'astronomia ellenistica*

Si ritiene in genere che l'*Almagesto* avesse reso obsolete le opere astronomiche più antiche.[92] Non bisogna però dimenticare che, mentre la tradizione astronomica era stata ininterrotta dall'epoca di Eudosso a Ipparco, Tolomeo ne è separato da secoli durante i quali l'attività scientifica era cessata[93] e si era prodotta una grave frattura culturale. Conquiste intellettuali quali la possibilità di creare consapevolmente nuove terminologie o nuovi stili pittorici erano state abbandonate insieme alla capacità di formulare nuovi insiemi di postulati. Abbiamo già visto in più casi come l'interruzione dell'insegnamento orale avesse reso incomprensibili le antiche opere conservate.[94]

La perdita del metodo scientifico aveva finito con il fare interpretare "realisticamente", cioè come affermazioni sulla natura anziché interne a un modello, le affermazioni scientifiche sopravvissute. Nel caso dell'astronomia, in particolare, mentre le decomposizioni dei moti dei pianeti effettuate nel primo ellenismo erano state modelli matematici usati come sistemi di calcolo, in età imperiale venne assegnata una realtà fisica a ciascun moto componente, interpretando anche le sfere omocentriche di Eudosso come sfere materiali.[95] Che la teoria degli epicicli fosse stata originariamente un modello matematico è evidente nel caso di Apollonio di Perga, che aveva proposto due modelli equivalenti per lo stesso moto.[96] Le interpretazioni "realistiche", anche se sono assenti nell' *Almagesto*, appaiono già in

[92] Toomer, ad esempio, scrive: "its success [dell'*Almagesto*] contributed to the loss of most of the work of Ptolemy's scientific predecessors, notably Hipparchus, by the end of antiquity, because, being obsolete, they ceased to be copied" ([Toomer: *Almagesto*], p.1).

[93] Questa interruzione, che è spesso ignorata, risulta anche dalle date delle osservazioni astronomiche citate nell'*Almagesto*, che sono distribuite su un periodo di quasi un millennio, dal 720 a.C. al 150 d.C., con una significativa interruzione di 218 anni: dal 126 a.C. (data dell'ultima osservazione citata di Ipparco) al 92 d.C. (data di un'osservazione della Luna di Agrippa). La distribuzione è mostrata in un istogramma in [Russo 5], che è la fonte di molto del materiale di questo capitolo.

[94] Ricordiamo, come ulteriore esempio tra i tanti possibili, che Epitteto, che all'inizio del II secolo d.C. è considerato il maggiore esponente della scuola stoica, ammette con naturalezza di non essere in grado di capire le opere di Crisippo (contribuendo così a spiegarci il perché della loro perdita). Cfr. Epitteto, *Manuale*, xlix.

[95] Il primo a comprendere il significato puramente algoritmico delle sfere di Eudosso, dopo la fine dell'ellenismo, è stato l'astronomo Schiaparelli, nel XIX secolo.

[96] I modelli consistevano nell'uso o di un epiciclo con la stessa velocità angolare del deferente oppure di un solo moto circolare uniforme eccentrico. Cfr. Tolomeo, *Almagesto*, XII, i, 452-455.

un'altra opera di Tolomeo: le *Ipotesi planetarie*, dove Tolomeo descrive un complicato sistema meccanico, nel quale i moti circolari sono supposti svolgersi su sfere materiali incastonate in gusci sferici ruotanti.[97] L'idea delle "sfere planetarie" materiali non sarà più abbandonata fino all'Età Moderna.

Tolomeo scrisse un'opera di astrologia, il *Tetrabiblos*, mentre nessun astronomo del periodo aureo aveva fatto altrettanto.[98] Nel *Tetrabiblos* i pianeti sono classificati in base a una duplice bipartizione: maschili e femminili, benefici e malefici.[99]

Il rapporto tra i cataloghi stellari di Tolomeo e di Ipparco è stato oggetto di molte polemiche. La tesi che le coordinate stellari di Tolomeo siano dedotte, almeno in gran parte, dal catalogo di Ipparco e non da osservazioni indipendenti, generalmente accettata dall'epoca di Tycho Brahe all'inizio del XX secolo, anche se successivamente confutata da Vogt e da Neugebauer,[100] è stata recentemente dimostrata da Grasshoff con un'analisi statistica di tutti i dati disponibili.[101]

Un indizio sul rapporto tra Tolomeo e le sue fonti è fornito dalla circostanza che quando affronta in più opere lo stesso problema Tolomeo cambia ogni volta il metodo usato, senza autocitarsi quasi mai. Abbiamo già visto, ad esempio, che in ciascuna delle tre opere nelle quali si occupa dei pianeti (*Almagesto*, *Ipotesi planetarie* e *Tetrabiblos*) la metodologia usata è completamente diversa. Analogamente il fenomeno dell'apparente aumento delle dimensioni dei corpi celesti presso l'orizzonte è studiato sia nell'*Almagesto* che nell'*Ottica*,[102] ma le due spiegazioni offerte sono completamente diverse (l'una basata sulla rifrazione e l'altra psicologica) e nessuna delle due menziona l'altra.

Un particolare relativo alla geografia può illustrare la metodologia di Tolomeo. Sia Eratostene che Ipparco, usando un criterio analogo a quello dei geografi inglesi che adottarono il me-

[97] Le *Ipotesi planetarie* si sono conservate in arabo e solo parzialmente in greco. La traduzione dall'arabo è stata pubblicata in [Goldstein].

[98] Non si conosce alcun oroscopo, né in greco né in demotico, databile prima dell' 80 a.C. Cfr. [Neugebauer, HAMA], p. 1371, dove è riportato in un istogramma il numero di oroscopi noti in greco e in demotico per ciascun decennio.

[99] Tolomeo, *Tetrabiblos*, I, 5-6; vi è però anche chi partecipa di entrambe le nature: il pianeta Mercurio, ad esempio, è un rappresentante del terzo sesso.

[100] [Vogt]; [Neugebauer, HAMA], pp. 280-284.

[101] [Grasshoff]. Le coordinate date da Tolomeo, per la perdita del catalogo di Ipparco, possono essere confrontate solo con quelle citate da Ipparco nel commento al poema di Arato. Grasshoff conclude che, pur non potendosi ovviamente escludere che Tolomeo abbia incluso nel suo catalogo anche coordinate da lui misurate, le informazioni contenute nel commento ad Arato sono sufficienti per dimostrare che almeno una metà del catalogo di Tolomeo è basata sui dati di Ipparco.

[102] Tolomeo, *Almagesto*, I, iii, 13; Tolomeo, *Ottica*, III ([Govi: Tolomeo], pp. 77-78).

ridiano di Greenwich, avevano scelto come longitudine zero quella di Alessandria.[103] Tolomeo, nella *Geografia*, preferisce invece contare le longitudini a partire dalle lontane e mal note "Isole Fortunate". Come mai? Evidentemente perché queste isole avevano la proprietà di trovarsi all'estrema sinistra delle carte. Questo criterio di scelta del meridiano di riferimento non è certo adatto per compilare nuove carte, né è particolarmente utile per i marinai che vogliano usarle, ma è il mezzo più comodo per trasferire informazioni da un libro all'altro.

Nell' *Almagesto* vi è l'esposizione di un sistema per prevedere i moti dei pianeti, ma manca ogni spiegazione sull'origine del sistema usato. Si spiega cioè come usare un algoritmo (che dipende in particolare dal valore, che viene fornito, di alcuni parametri) per calcolare le posizioni dei pianeti, ma non si spiega come i valori dei parametri siano stati desunti dai dati sperimentali. Come negli altri campi, anche in astronomia non interessa più sapere come costruire le teorie, ma solo come usarle.

Perché l'Almagesto potesse incorporare le conoscenze astronomiche contenute nelle opere precedenti era necessario che Tolomeo le conoscesse e che ne comprendesse completamente la metodologia. Le considerazioni precedenti possono giustificare dei dubbi sulla seconda condizione. Quanto alla prima, abbiamo già notato che indizi della incompleta conoscenza delle opere di Ipparco da parte di Tolomeo sono forniti sia dagli strumenti di misura (la diottra descritta da Erone, con ogni probabilità nota a Ipparco, è sconosciuta a Tolomeo[104]) che dalla geografia: Tolomeo ignora infatti il valore della lunghezza di un grado di meridiano, misurato da Eratostene e ben noto a Ipparco.

Tolomeo stesso, d'altra parte, scrive:

> Ipparco non ha neppure iniziato a formulare teorie planetarie, almeno nelle opere giunte fino a noi.[105]

La precisazione di Tolomeo, che può apparire dovuta a generica cautela,[106] acquista il suo pieno significato alla luce della circostanza che Tolomeo conosceva almeno i titoli di tutte le opere di Ipparco; in un precedente passo dell' *Almagesto* egli aveva infatti citato letteralmente un brano della *Lista delle proprie opere* di Ipparco.[107] La frase di Tolomeo che abbiamo ripor-

[103] Come sappiamo da Strabone (*Geografia*, I, iv, 1).
[104] Cfr. p. 147, n. 125.
[105] Tolomeo, *Almagesto*, IX, ii, 210.
[106] Tale in effetti appare a Toomer ([Toomer: *Almagesto*], p. 421).
[107] Tolomeo, *Almagesto*, III, i, 207: il passo è stato interpretato correttamente per la prima volta da Rehm e Toomer è certo di questa interpretazione (cfr. [Toomer: *Almagesto*], p. 139).

tato è nel secondo capitolo del IX libro dell'*Almagesto* in cui si introduce lo studio del moto dei pianeti. Tolomeo vi sostiene di essere il primo ad avere elaborato una teoria planetaria e l'affermazione su Ipparco (unico scienziato qui citato) è parte essenziale di questa rivendicazione di priorità. Dobbiamo pensare che Tolomeo, che dedica un notevole spazio alla inesistenza della teoria planetaria di Ipparco, polemizzasse contro l'opinione che Ipparco avesse almeno iniziato a formularne una. Non si capirebbe altrimenti come mai uno scienziato inizi a esporre un argomento scientifico dedicando tanto spazio a un predecessore di tre secoli prima che non se ne era occupato affatto.

L'idea, largamente diffusa, che l'*Almagesto* avesse incluso tutte le conoscenze astronomiche precedenti può dipendere, tautologicamente, dalla circostanza che, per la perdita delle opere più antiche, l'astronomia precedente viene ricostruita sulla base dell'*Almagesto*. D'altra parte sappiamo che tra le idee astronomiche ellenistiche non incluse nell'*Almagesto* vi è, se non altro, quella sulla quale si è basata la "rivoluzione copernicana" dell'età moderna: l'eliocentrismo di Aristarco. Abbiamo già trovato nei §§ 3.7 e 3.8 dei motivi per dubitare della diffusa convinzione che si fosse trattato di un'idea isolata e subito abbandonata.

In definitiva, per ricostruire l'astronomia ellenistica del tempo di Ipparco potrebbe essere decisiva l'analisi della letteratura precedente l'*Almagesto*.

9.6. *Un brano di Seneca*

Seneca scrive:

> Di queste cinque stelle, che si mostrano a noi ed apparendo ora in un luogo ed ora in un altro non possono non suscitare la nostra curiosità, da poco abbiamo cominciato a capire come sorgano al mattino o alla sera, dove stazionino, quando si spostino in linea retta, perché ritornino indietro; se Giove si immerga o tramonti o sia retrogrado (questo nome infatti gli hanno attribuito quando resta indietro), l'abbiamo stabilito da pochi anni. [108]

Le "cinque stelle" sono evidentemente i pianeti. Poco prima del brano riportato Seneca aveva affermato, a proposito delle

[108] "Harum quinque stellarum, quae se ingerunt nobis, quae alio atque alio occurrentes loco curiosos nos esse cogunt, qui matutini vespertinique ortus sint, quae stationes, quando in rectum ferantur, quare agantur retro, modo coepimus scire; utrum mergeretur Iupiter an occideret an retrogradus esset (nam hoc illi nomen imposuere cedenti), ante paucos annos didicimus" (Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, xxv, 5).

stelle fisse, che i Greci avevano iniziato a dar loro un nome "da neppure millecinquecento anni". È chiaro quindi che i "pochi anni" di cui parla non debbono essere presi alla lettera, ma vanno riferiti a una scala temporale enormemente lunga.

È generalmente ammesso che Seneca abbia composto la sua opera attingendo essenzialmente a un'unica fonte, risalente al I secolo a.C. Si deve quindi dedurre dal passo che abbiamo letto che nel I secolo a.C. fosse ancora vivo il ricordo di una nuova teoria che permetteva di "cominciare a capire" i moti planetari. L'assenza di astronomi successivi a Ipparco e precedenti Seneca rende molto improbabile che Seneca possa riferirsi ad una teoria ignota ad Ipparco. Il passo di Seneca rafforza quindi il sospetto che Ipparco, contrariamente all'affermazione di Tolomeo, avesse almeno iniziato a elaborare una nuova teoria planetaria.

Le informazioni di Seneca sulla "nuova" teoria sono nel passo successivo:

> Abbiamo trovato chi ci ha detto: "Sbagliate, pensando che qualche stella interrompa il suo cammino o lo inverta. Non è permesso ai corpi celesti fermarsi né invertire il moto; tutti avanzano: come una volta sono stati lanciati, così procedono; la fine del loro cammino coinciderebbe con la loro stessa fine. Quest'opera eterna ha moti irrevocabili: se dovessero arrestarsi, quei [corpi] ora conservati dal loro moto regolare cadrebbero gli uni sugli altri. Qual è allora il motivo per cui alcuni sembrano tornare indietro? L'intervento del Sole e la natura dei percorsi e delle orbite circolari, disposte in modo che per un certo tempo ingannano gli osservatori, impone loro un'apparenza di lentezza: così le navi, sebbene procedano a vele spiegate, sembrano tuttavia star ferme". [109]

Seneca afferma che i pianeti non possono invertire il moto: i corpi celesti sono conservati nelle loro orbite dal loro moto regolare; essi non possono fermarsi perché, se lo facessero, "cadrebbero gli uni sugli altri (*alia aliis incident*)". Sembra la stessa idea spiegata più diffusamente, nel caso della Luna, da Plutarco nel *De facie...*, ma con una differenza significativa: la gravità sembra qui concepita come azione reciproca tra corpi.

L' "argomento della fionda" riferito da Plutarco, quello cioè che, con il linguaggio moderno, possiamo chiamare l'argomento

[109] "Inventi sunt qui nobis dicerent: 'Erratis, quod ullam stellam aut supprimere cursum iudicatis aut vertere. Non licet stare caelestibus nec averti; prodeunt omnia: ut semel missa sunt, vadunt; idem erit illis cursus qui sui finis. Opus hoc aeternum irrevocabiles habet motus: qui si quando constiterint, alia aliis incident, quae nunc tenor et aequalitas servat. Quid est ergo cur aliqua redire videantur? Solis occursus speciem illis tarditatis imponit et natura viarum circolorumque sic positorum ut certo tempore intuentes fallant: sic naves, quamvis plenis velis eant, videntur tamen stare'" (Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, xxv, 6-7).

dell'equilibrio tra gravità e forza centrifuga può spiegare abbastanza facilmente il moto della Luna attorno alla Terra, almeno se, come suggerito dal passo di Plutarco, ci si accontenta di una descrizione approssimata, basata sull'uso di orbite circolari. L'estensione dello stesso argomento ai pianeti si scontra però con una grave difficoltà. Come mai all'atto delle stazioni planetarie (quando la forza centrifuga sembra annullarsi) i pianeti non iniziano a cadere sulla Terra? È questo il motivo dell'interesse per le stazioni planetarie riferito da Seneca e il senso della sua domanda: come mai (se gli astri non possono né fermarsi né invertire il moto senza iniziare a cadere gli uni sugli altri) alcuni pianeti sembrano a volte tornare indietro?

Seneca spiega le retrogradazioni alludendo alla combinazione di più moti circolari ("natura viarum circolorumque sic positorum..."). Il moto retrogrado dei pianeti, risultante in certi intervalli di tempo da tale combinazione, è solo un "inganno (...ut certo tempore intuentes fallant)", mentre il moto reale è quello nel quale i pianeti non invertono mai il moto.

La fonte di Seneca avrebbe potuto spiegare che il moto apparente del pianeta (il moto cioè relativo alla Terra) risulta dalla combinazione di due orbite circolari, entrambe centrate nel Sole e percorse rispettivamente dalla Terra e dal pianeta, mentre il moto "reale" del pianeta si svolge sulla seconda delle due circonferenze. Questa descrizione dei moti planetari può spiegare bene il fenomeno delle retrogradazioni ed, essendo stata proposta da Aristarco di Samo, all'epoca della fonte di Seneca era nota agli astronomi ellenistici da circa due secoli. Naturalmente le parole di Seneca sulla combinazione di più orbite circolari ammettono, di per sé, altre interpretazioni, e in particolare potrebbero suggerire una teoria epiciclica geocentrica. Mi sembra però che l'eliocentrismo della fonte di Seneca emerga con sufficiente chiarezza dalle considerazioni seguenti.

In primo luogo l'eliocentrismo è in grado di risolvere il problema dinamico riferito da Seneca; l' "argomento della fionda" può infatti essere applicato al moto dei pianeti esattamente come al moto della Luna, purché tale moto venga riferito non alla Terra ma al Sole, mentre il problema posto da Seneca appare difficilmente risolubile in un ambito geocentrico.

In secondo luogo una teoria epiciclica di tipo "tolemaico" spiegherebbe il moto dei pianeti senza alcun riferimento al Sole, mentre il Sole aveva certamente un ruolo nella spiegazione dei moti planetari fornita dalla fonte di Seneca (Seneca menziona infatti un "solis occursus").

In terzo luogo l'affermazione di Seneca che le stazioni planetarie sono solo un inganno e l'analogia con la nave che, pur correndo, appare ferma, sembrano implicare che il moto "vero "

(nel quale i pianeti non invertono mai il moto) non sia quello relativo alla Terra. È certo infatti che l'accenno alla nave sia un'illustrazione della relatività del moto, giacché lo stesso esempio è riportato da vari autori e in particolare è sviluppato più chiaramente da Lucrezio.[110]

Notiamo, infine, che la possibilità di una Terra in moto era stata certamente presa in considerazione dalla fonte di Seneca, poiché in un passo precedente dello stesso libro Seneca aveva riferito la possibilità di spiegare il moto diurno del cielo con la rotazione terrestre.[111]

Dobbiamo concludere che la fonte di Seneca applicasse al moto dei pianeti attorno al Sole l'idea riferita da Plutarco nel caso della Luna: l'idea cioè dell'equilibrio tra interazione gravitazionale e forza centrifuga. Poiché l'eliocentrismo permette di spiegare in questo modo il moto dei pianeti, superando la difficoltà posta dalle stazioni planetarie, si otteneva così una giustificazione dinamica della teoria eliocentrica. Poiché la fonte di Seneca non può non esporre idee dell'astronomia ellenistica del II secolo a.C. (cioè proprie dell'astronomia di Ipparco) la conclusione raggiunta è coerente con la tesi del §9.3 che la fonte del brano del *De facie...* lì esaminato fosse l'opera di Ipparco sulla gravità.[112]

9.7. *Raggi di buio e raggi triangolari*[113]

Anche se non esistono vere opere astronomiche nel periodo compreso tra Ipparco e Tolomeo, la letteratura latina dei secoli I a.C. e I d.C. contiene, oltre ai passi di Seneca, almeno due esposizioni di argomenti astronomici con delle pretese di sistematicità: nel II libro della *Naturalis historia* di Plinio e nel IX libro del *De architectura* di Vitruvio. Poiché l'attività astronomica di Ipparco era continuata, a Rodi, anche dopo l'interruzione delle attività scientifiche ad Alessandria (del 145 a.C.) e poiché Roma aveva mantenuto importanti rapporti commerciali e cultu-

[110] "Qua vehimur navi, fertur, cum stare videtur;/ quae manet in statione, ea praeter creditur ire./ et fugere ad puppim colles campique videntur,/ quos agimus praeter navem velisque volamus" (*De rerum natura*, IV, 387-390). Il passo di Lucrezio è parallelo a quello di Seneca, come mostrato in [Russo 3] sulla base dei rispettivi contesti.

[111] Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, ii, 3.

[112] Anche se in genere si è supposto che l'opera di Ipparco sulla gravità non avesse rapporto con i suoi interessi astronomici, Heath aveva affermato che "It is possible that even in this work Hipparchus may have applied his doctrine to the case of the heavenly bodies" ([Heath HGM], p. 256).

[113] Il contenuto di questo paragrafo è tratto in gran parte da [Russo 4] e [Russo 5].

rali con Rodi fino alla metà del I secolo a.C., non sarebbe troppo strano trovare in queste opere tracce di idee di Ipparco ignote a Tolomeo. Tanto più che Plinio, elencando le fonti straniere del II libro della *Naturalis historia*, non solo cita al primo posto Ipparco, ma gli tributa anche ripetuti ed entusiastici elogi, lamentandosi in particolare che non vi fosse stato nessuno in grado di raccoglierne l'eredità scientifica.[114] Poiché Plinio parla esplicitamente di una teoria particolarmente ingegnosa, capace di spiegare il moto dei pianeti (in particolare di quelli superiori), da lui divulgata per la prima volta,[115] dobbiamo pensare che si trattasse della teoria di Ipparco. È molto improbabile che Plinio avesse osato leggere direttamente qualche opera di Ipparco, ma le sue affermazioni provano che una teoria planetaria attribuita a Ipparco era esposta in opere ancora disponibili a Roma nel I secolo d.C.

Quanto al contenuto della teoria, non è certo facile ricostruirlo dalle pagine della *Naturalis historia*. È però chiaro che tra le fonti di Plinio ve ne è qualcuna scientifica, poiché alcuni dati riferiti, come i periodi delle rivoluzioni planetarie, sono ragionevolmente accurati.

Anche Plinio afferma, come Seneca, che le stazioni planetarie sono un fenomeno apparente[116] e ciò suggerisce che anche la sua fonte fosse eliocentrica. Vitruvio aggiunge una bizzarra spiegazione delle apparenti retrogradazioni e stazioni dei pianeti esterni, che egli afferma di non condividere, basata su una strana "oscurità" che secondo alcuni sarebbe prodotta dal Sole.[117] È poco probabile che qualcuno avesse veramente sostenuto che il Sole emettesse raggi di buio. Sembra ben più plausibile che Vitruvio avesse frainteso l'argomento eliocentrico riferito da Seneca e cui allude Plinio. La fonte aveva probabilmente espresso la considerazione (che abbiamo trovato anche in Seneca) che il moto reale dei pianeti non è direttamente individuabile dagli osservatori terrestri per un motivo che coinvolge il Sole. Vitruvio ne aveva dedotto, poco felicemente, che il moto

[114] Plinio, *Naturalis historia*, II, 95. Ipparco è nominato anche da Vitruvio (*De architectura*, IX, vi, 3).

[115] Plinio inizia l'esposizione del moto dei pianeti superiori con la frase "aperienda est subtilitas immensa et omnes eas complexa causas" (II, 67) e termina con "Haec est superiorum stellarum ratio; difficilior reliquarum et a nullo ante nos reddita" (II, 71).

[116] "Hoc non protinus intellegi potest visu nostro, ideoque existimantur stare, unde et nomen accepit statio" (Plinio, *Naturalis historia*, II, 70).

[117] "Id autem nonnullis sic fieri placet, quod aiunt solem, cum longius absit abstantia quadam, non lucidis itineribus errantia per ea sidera obscuritatis morationibus impedire. Nobis vero id non videtur" (*De architectura*, IX, i, 11). Vitruvio continua sostenendo che la spiegazione appena riferita è certamente errata perché il Sole ha la proprietà di illuminare e non quella di oscurare.

fosse *oscurato* dal Sole. L'eliocentrismo della fonte di Vitruvio sembra d'altra parte confermato dall'esposizione dei moti di Mercurio e Venere, che è esplicitamente eliocentrica.[118]

Il passo più interessante di Vitruvio è probabilmente il seguente:

> la potente forza del sole attira a sé i pianeti con raggi estesi a forma di triangolo e come se li frenasse e trattenesse quando corrono in avanti non permette loro di avanzare ma [li costringe] a ritornare verso di sé [...][119]

Un passo parallelo è in Plinio, che scrive:

> [I pianeti], colpiti nella posizione che abbiamo detto, sono impediti da un raggio triangolare del sole a proseguire in linea retta e sono tratti in alto dalla [sua] forza ardente.[120]

Le corrispondenze tra i due testi sono significative soprattutto alla luce dell'identità del contesto: ambedue gli autori, infatti, stanno spiegando il moto dei tre pianeti esterni (Marte, Giove e Saturno). È chiara in ambedue i passi l'idea dell'attrazione esercitata dal Sole sui pianeti ed è particolarmente interessante l'idea, riferita da Plinio, che questa attrazione abbia l'effetto di impedire il moto dei pianeti in linea retta.

Il seguito del brano di Vitruvio è particolarmente oscuro. Leggiamolo:

> e ad essere in un "signum" dell'altro triangolo. Forse si vorrà sapere perché il sole nei suoi ardori attiri indietro nel quinto "signum", invece che nel secondo o terzo, che sono più vicini. Esporrò perciò in qual modo ciò sembri accadere. I suoi raggi si estendono nell'universo lungo linee a forma di triangolo con lati eguali. Ciò però non si estende né più né meno che al quinto "signum" da sé. Quindi [...][121]

Per la comprensione di questo passo è essenziale capire il senso in cui Vitruvio e, soprattutto, la sua fonte, avevano usato

[118] Vitruvio, *De architectura*, IX, i, 6.

[119] "Solis impetus vehemens radiis trigoni forma porrectis insequentes stellas ad se perducit et ante currentes veluti refrenando retinendoque non patitur progredi sed ad se regredi [...]" (Vitruvio, *De architectura*, IX, i, 12).

[120] "Percussae in qua diximus parte et triangulo solis radio inhibentur rectum agere cursum et ignea vi levantur in sublime" (Plinio, *Naturalis historia*, II, 69).

[121] "[...] in alterius trigoni signum esse. Fortasse desiderabitur, quid ita sol quinto a se signo potius quam secundo aut tertio, quae sunt propiora, facit in his fervoribus retentiones. Ergo, quemadmodum id fieri videatur, exponam. Eius radii in mundo uti trigoni paribus lateribus formae liniationibus extenduntur. Id autem nec plus nec minus est ad quintum ab eo signo. Igitur [...]" (Vitruvio, *De architectura*, IX, i, 13).

il termine *signum*, che abbiamo lasciato in latino. Si è in genere supposto che con *signum* si intendesse un segno zodiacale e a favore di questa interpretazione vi è l'argomento, che può apparire decisivo, che altrove (anche in passi precedenti dello stesso capitolo) Vitruvio usa certamente il termine in questo senso. Osserviamo però che il brano precedente sulla strana "oscurità" prodotta dal Sole mostra come Vitruvio abbia delle difficoltà nel seguire la sua fonte astronomica. Tra poco, del resto, Vitruvio troncherà l'argomento appellandosi all'autorità di Euripide e ciò dà un'ulteriore indicazione sulla sua scarsa dimestichezza con l'argomento trattato. D'altra parte nel brano che abbiamo trascritto gli accenni a linee e triangoli alludono chiaramente a una costruzione geometrica. Possiamo quindi supporre che Vitruvio stia cercando, con difficoltà, di riferire una fonte scientifica greca che descrive una costruzione geometrica. Se è questo veramente il caso, un aiuto alla comprensione della fonte può venire dal tradurre letteralmente in greco i termini più oscuri di Vitruvio. Traduciamo letteralmente in greco le espressioni *secundum signum*, *tertium signum* e *quintum signum*: il termine latino *signum* diviene allora σημεῖον; quanto agli ordinali *secundum*, *tertium* e *quintum*, in greco essi vengono indicati rispettivamente con le lettere dell'alfabeto β, γ ed ε. Il termine greco σημεῖον, come sappiamo, oltre al significato originale di "segno" aveva però assunto, da Euclide in poi, anche il significato tecnico di "punto"[122] e le lettere dell'alfabeto non servivano solo per i numeri ordinali, ma anche, tra l'altro, per indicare i punti di una costruzione geometrica. In un contesto caratterizzato dalla presenza di triangoli e linee le traduzioni letterali in greco delle espressioni latine *secundum signum*, *tertium signum* e *quintum signum* vengono quindi ad assumere il chiaro significato di punto B, punto Γ e punto E di una costruzione geometrica. Poteva essere effettivamente questo il significato, equivocato da Vitruvio, delle espressioni greche originali?

Vitruvio, quando parla di diagrammi che capisce, usa espressioni come "dove sarà la lettera A" oppure "si tracci una linea dalla lettera S"[123]; egli usa cioè le lettere non come simboli di punti ma direttamente per individuare le zone del disegno in cui sono situate. In un passo nel quale il termine *signum* viene usato in un senso che sembra corrispondere approssimativamente al concetto di punto (evidentemente perché il termine è usato per tradurre il greco σημεῖον) Vitruvio scrive (la sottolineatura ovviamente è mia) "da quel segno e lettera C si conduca

[122] Cfr. sopra, p. 72.
[123] "Ubi erit littera A" (Vitruvio, *De architectura*, IX, vii, 2); "ab littera S ducatur linea" (Vitruvio, *De architectura*, IX, vii, 6).

una linea al centro, dove è la lettera A".[124] È chiaro quindi che neppure in questo caso Vitruvio con il termine *signum* intende un *punto*, denotato da una lettera; si tratta semplicemente di un *segno*, che si trova *presso* la lettera. L'assenza, nell'opera di Vitruvio, del concetto geometrico astratto di "punto" non può stupire né deve essere considerata un suo limite personale. Bisogna ricordare che, poiché all'epoca non era mai stata scritta un'opera di geometria in latino, non era facile esprimere in questa lingua il concetto di punto.

La differenza tra il concetto astratto espresso dai matematici greci con il termine σημεῖον e quello concreto di *signum* (nel senso di "segno sulla carta") con il quale uno scrittore latino come Vitruvio lo sostituisce può essere importante per l'interpretazione di brani di argomento astronomico. Lo stesso termine latino *signum* poteva infatti indicare anche il "segno dello zodiaco" (che in greco era detto ζῴδιον). In ogni caso il termine latino manteneva un significato concreto; naturalmente il contesto permetteva in genere di capire di quale *signum* si parlasse: se ad esempio di un *signum* sulla carta o di un *signum* nel cielo. Si capisce quali problemi potessero nascere nel caso di un'opera scientifica greca che avesse fatto delle affermazioni su un σημεῖον dello spazio astronomico. Poiché in latino un *signum* poteva essere identificato come un segno dello zodiaco per la sua localizzazione nel cielo, un lettore latino avrebbe potuto pensare che in questo caso il termine σημεῖον indicasse questo tipo di "segno"; in ogni caso gli sarebbero mancati gli strumenti linguistici per tradurre correttamente il testo in latino. Quanto all'associazione tra lettere e *signa*, poiché per Vitruvio si tratta al più di una relazione di contiguità spaziale, essa non poteva essere facilmente estesa ai "segni" presenti nel cielo, dove certo non vi sono lettere. Poiché in greco le lettere dell'alfabeto sono usate anche come numeri ordinali, poteva essere naturale, in questo caso, interpretare le lettere in questo secondo modo e intendere quindi espressioni come σημεῖον B e σημεῖον E (cioè "punto B" e "punto E") come "secondo segno" e "quinto segno".

Assumendo che la fonte si riferisse effettivamente a punti di una costruzione geometrica, è possibile ricostruire la figura originale sulla base dell'esposizione di Vitruvio?

Osserviamo, innanzitutto, che Vitruvio parla di triangoli "con lati eguali" (*paribus lateribus*). Può sembrare che questa espressione si riferisca a triangoli equilateri, ma poiché una traduzione letterale dal greco ἰσοσκελής avrebbe fornito le stesse parole latine, i triangoli potrebbero anche essere solo isosceli.

[124] "Ab eo signo et littera C per centrum, ubi est littera A, linea perducatur" (Vitruvio, *De architectura*, IX, vii, 3).

Le parole "eius radii in mundo uti trigoni paribus lateribus liniationibus extenduntur", suggerendo che in ciascun triangolo i lati eguali siano formati da raggi uscenti dal Sole, fanno preferire la seconda possibilità. Inoltre, poiché l'espressione "lati eguali (*paribus lateribus*)" sembra riferirsi a tutti i triangoli da essi formati, i *raggi* considerati (per proprietà transitiva) debbono essere tutti eguali tra loro.

Sembra, in definitiva, che la costruzione geometrica dovesse contenere dei triangoli isosceli i cui lati eguali sono tutti raggi di un cerchio centrato nel Sole (notiamo che la parola latina *radius*, come il termine italiano *raggio* con cui l'abbiamo tradotta, può riferirsi sia al Sole che a un cerchio).

L'uso del pronome *alter* nell'espressione *alterius trigoni* implica che i triangoli isosceli considerati sono due. Otteniamo così la fig. 1, dove abbiamo indicato con H la posizione del Sole.

L'ultima posizione considerata del pianeta è, nelle parole di Vitruvio, nel quinto *signum*, che è un *signum* del secondo dei due triangoli. Secondo la nostra interpretazione, il significato originale di questa affermazione sarebbe stato quello che il pianeta, al termine dei moti descritti, si sarebbe trovato nel punto E, vertice del secondo dei due triangoli isosceli (un *signum* di un triangolo essendone semplicemente un vertice). Otteniamo così la fig. 2.

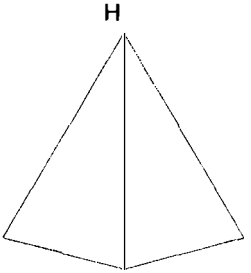


Fig. 1

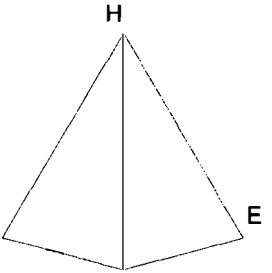


Fig. 2

L'uso della lettera E (e la sua interpretazione di Vitruvio come *quinto*) fa pensare che fossero state prese in considerazione cinque posizioni del pianeta. Sembra facile identificare tre di queste con i vertici diversi da H dei triangoli in figura. Notiamo che, poiché si tratta di punti posti su una circonferenza centrata nel Sole, la loro interpretazione come posizioni successive del pianeta sembra coerente con l'eliocentrismo che già ci era sembrato di poter individuare nella fonte di Vitruvio. Dobbiamo ora determinare altri due punti, corrispondenti ad altre due posizioni prese in considerazione per il pianeta. L'affermazione di Vi-

truvio che il Sole, provocando lo spostamento del pianeta nel quinto *signum*, lo avvicina a sé (*ad se regredi*) suggerisce che l'ultima posizione considerata prima di E (posizione che presumibilmente era stata denotata con la lettera Δ) fosse sulla retta HE e al di là del punto E. Poiché Plinio, che sembra usare la stessa fonte, afferma che il Sole impedisce ai pianeti di proseguire in linea retta, possiamo supporre che il punto Δ rappresentasse la posizione virtuale nella quale il pianeta si sarebbe trovato in assenza dell'azione del Sole. Il punto Δ risulta così individuato come l'intersezione della semiretta HE con il prolungamento (lungo la tangente) della frazione precedente dell'orbita. Poiché la presenza dei due triangoli isosceli suggerisce che l'intera costruzione possa essere ottenuta iterando due volte lo stesso procedimento (secondo l'uso sempre seguito dai matematici greci nell'esposizione di procedimenti iterativi) otteniamo infine la fig. 3.

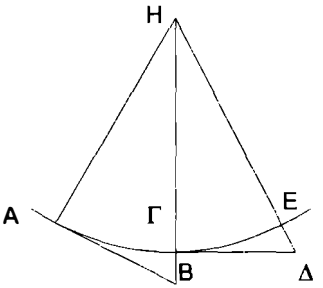


Fig. 3

Il significato della figura è chiaro. Essa mostra come l'orbita (supposta circolare) di un pianeta possa essere costruita con una successione di piccoli tratti, ciascuno dei quali è ottenuto con la composizione di due spostamenti simultanei: uno lungo la tangente dell'orbita (spostamento che sarebbe quello reale del pianeta se, in assenza dell'azione del Sole, esso potesse procedere in linea retta, come dice Plinio) e un altro diretto verso il Sole. La figura non è altro che un'illustrazione dell'idea riferita in modo qualitativo da Plutarco: il moto del pianeta è infatti il risultato di una successione di "spinte verso il centro". Per quanto riguarda lo strumento tecnico dell'addizione dei vettori spostamento, abbiamo già ricordato a p. 251 che essa non solo è riferita da Erone e dall'autore dei *Problemi meccanici* pseudo-aristotelici, ma è anche usata dallo pseudo-Aristotele proprio per spiegare come un moto circolare uniforme possa essere considerato una combinazione continua di uno spostamento "secondo natura (κατὰ φύσιν)" lungo la tan-

gente con uno spostamento "contro natura (παρὰ φύσιν)" diretto verso il centro.[125]

La figura che abbiamo disegnato può spiegare l'origine delle affermazioni di Plinio e di Vitruvio (altrimenti difficilmente comprensibili) che i pianeti sono trattenuti dal proseguire in linea retta da "raggi del Sole a forma di triangolo".

Le parole con cui Vitruvio cerca di spiegare cosa ha di particolare il "quinto segno" ("id autem nec plus nec minus est ad quintum ab eo signo") sembrano confermare che i *signa* fossero, nella fonte, dei punti: la relazione di esatta eguaglianza tra distanze espressa con le parole "nec plus nec minus" appare infatti più adatta a determinare la posizione di un punto che non quella di un segno zodiacale. Inoltre la frase di Vitruvio corrisponde al procedimento con il quale il punto E si ottiene nella costruzione proposta: esso viene infatti determinato come quel punto della semiretta HΔ che rende il lato HE esattamente eguale ("nec plus nec minus") all'altro lato, HΓ, del triangolo.

Naturalmente l'affermazione di Vitruvio che il secondo e il terzo "signum" siano più vicini al Sole del quinto "signum" è falsa se riferita ai punti B, Γ ed E della figura che abbiamo disegnato. Secondo l'interpretazione proposta si tratta di una naturale conseguenza dell'errore di Vitruvio. Avendo interpretato i punti della costruzione geometrica come segni zodiacali e le lettere usate per denotarli come numeri ordinali, egli avrebbe potuto pensare, infatti, che i segni dello zodiaco fossero stati ordinati a partire da quello nel quale era il Sole.

9.8. *L'idea di gravità da Aristotele a Ipparco*

In Aristotele il geocentrismo è strettamente legato al suo concetto di gravità. Il centro della Terra, che è anche il centro immobile del cosmo, è il "luogo naturale" cui tendono tutti gli oggetti "pesanti". Gli oggetti "leggeri" tendono invece verso l'"alto" (tendono cioè ad allontanarsi dal centro), grazie alla loro diversa natura.[126] Questa concezione (come tante altre opinioni aristoteliche) ha dominato nella tarda antichità e nel Medio Evo.

Alla fine del II secolo a.C., in base alle conclusioni raggiunte nei paragrafi precedenti, la gravità sarebbe stata concepita in modo completamente diverso. In questo paragrafo cercheremo

[125] Cfr. pseudo-Aristotele, *Problemi meccanici*, 849a.

[126] Aristotele, *Physica*, IV, 1; *De caelo*, I, 3; *De caelo*, IV. Idee sostanzialmente equivalenti erano state esposte da Platone (cfr., in particolare, *Timeo*, 62c-63e).

di seguire una traccia dell'evoluzione delle idee su questo argomento nei secoli III e II a.C., interpolando con la logica le scarse testimonianze.

L'eliocentrismo di Aristarco era ovviamente in esplicita opposizione alle idee di Aristotele. La critica al geocentrismo aveva portato anche a una critica della concezione aristotelica della gravità?

Notiamo che, indipendentemente (o meno) dalle idee di Aristarco, la teoria aristotelica era divenuta insostenibile dopo lo sviluppo dell'idrostatica archimedea. In primo luogo, infatti, Archimede aveva mostrato l'inesistenza della "leggerezza" come proprietà opposta al peso e ciò eliminava uno dei principali motivi per considerare i "corpi celesti" di natura diversa da quelli terrestri. Vi è però un altro punto, ancora più importante: Archimede, nel primo libro del suo trattato *Sui galleggianti* aveva dimostrato che ipotesi semplici sulla gravità (essenzialmente quella che la gravità fosse, come aveva pensato anche Aristotele, una forza a simmetria sferica agente verso il centro della Terra), congiunte a ipotesi semplici sui fluidi, implicavano necessariamente la forma sferica degli oceani (in condizioni di riposo). Questo risultato è di enorme importanza: si mostrava infatti che la forma sferica non è una forma che deve essere accettata come "naturale" per la sua perfezione, ma può essere ottenuta come conseguenza di poche ipotesi sulle forze elementari. Si deduceva cioè, per la prima volta, una caratteristica della costituzione attuale del mondo da leggi fisiche. Non vi è dubbio che la dimostrazione di Archimede (anche se l'oggetto del suo trattato ne restringe in quella sede l'applicazione agli oceani) fosse stata usata per spiegare la forma della Terra nel suo insieme. L'idea che la Terra fosse stata inizialmente fluida è riportata infatti da varie fonti e in particolare da Diodoro Siculo, che collega esplicitamente la forma assunta dalla Terra alla gravità.[127]

Una volta spiegata con la gravità la forma sferica della Terra, è inevitabile un altro passo: spiegare allo stesso modo l'evidente forma sferica del Sole e della Luna; questa forma non può non essere vista, da chi abbia letto il trattato di Archimede, come una prova indiretta della gravità di questi corpi: non verso il centro della Terra, naturalmente, ma verso il proprio centro. Non sappiamo chi abbia per primo tratto questa conseguenza.

[127] Diodoro Siculo, *Bibliotheca historica*, I, vii, 1-2. L'idea di una Terra inizialmente fluida poteva essersi formata nell'ambito degli studi geologici. Su questo argomento la nostra principale fonte di informazione sono i frammenti di Posidonio riportati da Strabone (*Geografia*, II, iii, 6). Le ricerche sulle trasformazioni della crosta terrestre in tempi geologici, compiute anche in relazione allo studio dei terremoti e del fenomeni vulcanici, risalivano almeno a Eratostene (cfr. Strabone, *Geografia*, I, iii, 4).

È ragionevole pensare che sia stato Archimede stesso, che, essendo molto interessato all'astronomia e considerando almeno ammissibile l'eliocentrismo di Aristarco, non aveva alcun motivo per restringere alla sola Terra la connessione, da lui individuata così chiaramente, tra forma sferica e gravità. Non si può dubitare, comunque, del fatto che questo passo sia stato effettivamente compiuto, poiché esso è documentato in Plutarco, che scrive:

> Come infatti il Sole attira a sé le parti di cui consiste, così anche la Terra [...].[128]

Avendo capito la ragione teorica della forma sferica della Terra, del Sole e della Luna, la stessa forma fu attribuita anche agli altri astri, nei quali non è direttamente riconoscibile.[129]

A questo punto il quadro aristotelico (che poi sarà di nuovo quello tolemaico) è stato scardinato dall'interno. L'universo non ha più una struttura gerarchica, centrata nella Terra e basata sulla distinzione tra corpi terrestri e corpi celesti, ma si presenta costituito da tanti mondi sostanzialmente equivalenti tra loro. La pluralità dei mondi è strettamente connessa con l'abolizione del cielo delle stelle fisse, la concezione di un universo infinito e la relatività del moto.[130] Anche queste idee, il cui ricordo avrà un ruolo tanto importante all'inizio dell'età moderna, sembrano avere dei precedenti, apparentemente prescientifici, nel pensiero dei presocratici.[131]

Tornando alla gravità, gli argomenti prima esposti lasciano due possibilità: o si pensa che la gravità abbia tanti centri indipendenti, uno per ogni corpo celeste, ciascuno in grado di attrarre i corpi del "proprio mondo" e solo quelli, oppure si pensa che esista anche un'attrazione tra astri diversi. La prima opinione fu certamente avanzata, perché è quella sostenuta esplicitamente nel *De facie...* da Lampria (alla cui argomentazione appartiene in particolare la frase sul Sole precedentemente citata[132]).

[128] ὡς γὰρ ὁ ἥλιος εἰς ἑαυτὸν ἐπιστρέφει τὰ μέρη ἐξ ὧν συνέστηκε, καὶ ἡ γῆ [...] (Plutarco, *De facie* ..., 924 E).

[129] Cfr. Diogene Laerzio, *Vite dei filosofi*, VII, 145. In realtà gli Stoici, secondo Diogene Laerzio, avrebbero attribuito agli astri la forma di uno *sferoide*. Le considerazioni svolte nel §9.4 possono far sospettare che ci si riferisse a ellissoidi. Il sospetto è forse rafforzato da un altro passo di Diogene Laerzio, nel quale, facendo risalire l'opinione a Epicuro, si parla di astri non solo *sferoidali* ma anche *ovoidali* (*Vite dei filosofi*, X, 74). È particolarmente interessante che nello stesso passo si sottolinei come non tutte le forme siano ammissibili.

[130] Torneremo su questo punto nel prossimo paragrafo.

[131] Cfr., in particolare, le testimonianze su Anassimandro raccolte in [Diels] al punto B11.

[132] Plutarco, *De facie* ... , 924 D-F.

L'idea di tanti centri di gravità, ciascuno caratteristico di un proprio "mondo" e senza interazione con gli altri, se può spiegare la forma degli astri, non risolve però il problema dei moti teoricamente ipotizzabili. Ci si può chiedere, infatti: come si muoverebbe un masso che fosse lontano da tutti gli astri? Questa domanda, di cruciale rilevanza per la fondazione di un'astronomia "dinamica" (e per la formulazione del principio d'inerzia), è effettivamente ricordata da Plutarco nello stesso contesto della teoria policentrica sostenuta anche da Lampria.[133]

Dobbiamo ora capire se fu presa in considerazione la possibilità di un'interazione gravitazionale tra corpi astronomici diversi.

Su questo punto le informazioni principali sono fornite da Strabone. Egli riferisce, in particolare, che Eratostene, sulla base dei suoi studi sulle maree, aveva criticato la conclusione del I libro del trattato *Sui galleggianti* di Archimede, sostenendo che la forma degli oceani non fosse esattamente sferica.[134] Si tratta di un'informazione molto interessante, perché pone una relazione tra gli studi sulle maree e gli studi sulla gravità condotti nell'ambito della scienza esatta ellenistica.

Poiché la dimostrazione di Archimede della sfericità degli oceani è ineccepibile, Eratostene sapeva che la forma sferica degli oceani è un'inevitabile conseguenza delle ipotesi sulla gravità assunte da Archimede. Egli aveva potuto raggiungere conclusioni diverse solo cambiando le ipotesi. Più precisamente egli aveva dovuto eliminare l'ipotesi della simmetria sferica della forza di gravità.[135] Poiché, come sappiamo da Strabone, Eratostene attribuiva le maree all'influenza della Luna, dobbiamo pensare che egli avesse sostenuto che le assunzioni di Archimede sulla gravità dovessero essere modificate tenendo conto dell'interazione con la Luna. Dobbiamo dedurne che nel III secolo a. C. un'interazione gravitazionale tra astri diversi fosse stata ipotizzata in almeno un caso: tra la Terra e la Luna.

Spiegare le maree con l'azione gravitazionale della Luna implica necessariamente un altro salto concettuale. La Terra, che

[133] Plutarco, *De defectu oraculorum*, 425C-D. Plutarco accenna in realtà a un masso lontano da tutti gli astri che secondo alcuni esisterebbe realmente, ma mi sembra che la natura *teorica* del problema del moto di un tale masso, anche se non può essere capita da Plutarco, risulti chiaramente dal contesto.

[134] Strabone, *Geografia*, I, iii, 11.

[135] Non è plausibile che Eratostene avesse negato proprietà di omogeneità e isotropia all'acqua (a parte l'esistenza dell' *Oceano congelato*, scoperto, come abbiamo visto a p. 125 (n. 31), da Pitea, che non sembra però troppo rilevante in relazione al problema considerato). Qualunque altra eventuale modifica delle ipotesi non avrebbe alterato la simmetria sferica del problema (e della sua unica soluzione).

Aristotele aveva pensato fosse l'unica fonte di gravità, non può certo essere sostituita dalla Luna in questo ruolo egemonico. Una volta capito che la Luna esercita la sua azione sulla Terra, l'unica conseguenza ragionevole è quella di ipotizzare un'azione reciproca. La gravità non può più essere concepita, a questo punto, come un'attrazione verso uno o più centri, ma solo come un'attrazione reciproca tra corpi. Si può anche pensare che la reciprocità valga solo tra Terra e Luna, grazie alla "natura terrena" di quest'ultima, senza estendere l'idea ad altri astri, ma questa estensione sembra naturale. Fu effettivamente compiuta?

Eratostene, a quanto riferisce Strabone, aveva spiegato le maree sulla base dell'azione della sola Luna. Se qualcun altro avesse scoperto l'influenza sulle maree del Sole, non si sarebbe potuto non ipotizzare un'interazione tra la Terra e il Sole e a questo punto l'idea di una gravitazione "universale" sarebbe divenuta naturale. In ogni caso l'interazione Terra-Sole sarebbe stata sufficiente per arrivare all'idea, che ci interessa, di un "eliocentrismo dinamico".

Seleuco, come sappiamo ancora da Strabone, studiando in particolare le maree del *Mare Eritreo* (cioè, probabilmente, dell'attuale Mare Arabico[136]), non ne aveva studiato solo il ciclo giornaliero e quello mensile, ma aveva anche trovato una relazione tra la differenza variabile tra le due maree giornaliere e alcuni fenomeni astronomici: in particolare aveva notato che le maree sizigiali[137] presentavano una differenza massima in prossimità dei solstizi e minima in prossimità degli equinozi, dando così luogo a un ciclo annuale.[138]

Seleuco aveva solo notato una correlazione tra l'andamento osservato delle maree e alcuni fenomeni astronomici o ne aveva dato una spiegazione teorica? La seconda possibilità emerge come la più probabile dalle considerazioni seguenti.

In primo luogo, la spiegazione "teorica" dell'effetto descritto da Seleuco non è troppo difficile. Basta per questo attribuire le maree all'interazione con la Luna e il Sole, ammettere che l'effetto di ciascuno dei due corpi celesti sia massimo dove appare allo zenit ed, equivalentemente, nel punto antipodale e tenere conto del ritardo col quale si presentano le maree reali. Una volta accettate tali ipotesi, non è difficile rendersi conto che le ma-

[136] Per *Mare Eritreo* si intendeva anche l'attuale Mar Rosso, ma poiché Strabone indica la provenienza di Seleuco una volta dal *Mare Eritreo* (*Geografia*, III, v, 9) e un'altra volta dalla *Babilonia* (*Geografia*, I, i, 8-9; xvi, i, 6), sembra che in questo caso egli intendesse il Mare Arabico.

[137] Cioè le maree (di ampiezza massima, nel ciclo mensile) che si hanno in corrispondenza dei pleniluni e dei noviluni.

[138] Strabone, *Geografia*, III, v, 9.

ree non troppo vicine all'Equatore dovrebbero avere l'andamento descritto da Seleuco, se la Terra fosse una perfetta sfera solida circondata da uno strato omogeneo di acqua.[139] Il punto interessante è che nel caso del Mare Arabico l'andamento reale delle maree (che è spesso lontano da quello "teorico") è in accordo sia con la descrizione di Seleuco sia con il semplice schema teorico accennato. Vale la pena di osservare che l'accordo tra la descrizione di Seleuco e l'andamento reale delle maree da lui osservate fu riconosciuto, nel 1898, da uno dei fondatori della moderna teoria delle maree, G.H. Darwin.[140]

In secondo luogo Plinio sembra testimoniare, almeno in parte, che le idee precedenti fossero presenti nella scienza ellenistica. Subito prima di parlare dell'attrazione lunare, egli afferma che causa delle maree sono la Luna e il Sole[141] e sembra riferirsi implicitamente a Seleuco quando accenna alle differenze tra le due maree giornaliere, che si annulla solo agli equinozi.[142] È particolarmente significativo che Plinio accenni al ritardo con cui appaiono le maree reali[143]: un'affermazione incomprensibile in assenza di una spiegazione teorica.

In terzo luogo, se Seleuco avesse ricondotto lo studio delle maree (che era stato inserito nell'ambito della scienza esatta ellenistica già all'epoca di Eratostene) in un ambito puramente empirico, non si capirebbe perché le testimonianze dovrebbero considerarlo un "matematico".[144]

Poiché il contributo essenziale di Seleuco alla teoria delle maree sembra essere stato lo studio del ciclo annuale delle diseguaglianze diurne, sembra logico dedurre dalle considerazioni precedenti che Seleuco avesse riconosciuto l'influenza sulle ma-

[139] Supponiamo, ad esempio, che vi sia un plenilunio al solstizio d'estate; trascurando i ritardi delle maree reali, dovrebbe esservi allora un'alta marea massima in un punto A del tropico del Cancro (a mezzogiorno) e, contemporaneamente, nel punto antipodale B, posto sul Tropico del Capricorno (dove è mezzanotte); dodici ore più tardi l'alta marea in A è inferiore, essendo eguale a quella presente dodici ore prima non in B ma nel punto C, opposto ad A sul tropico del Cancro. Con un ragionamento analogo è facile convincersi che le due maree giornaliere sono invece eguali, nello stesso punto A, se l'alta marea sizigiale si verifica durante un equinozio (e quindi la Luna e il Sole, essendo ancora approssimativamente allineati con la Terra, si trovano allo zenit non ai Tropici ma all'Equatore): in tal caso, infatti, il massimo assoluto dell'alta marea si ha sull'Equatore, in un punto altrettanto distante da A negli istanti delle due alte maree giornaliere. Negli altri giorni dell'anno si ha una situazione intermedia tra le due descritte.

[140] G.H. Darwin, *The Tides*, London,1898, p. 76.

[141] Plinio, *Naturalis historia*, II, 212.

[142] Plinio, *Naturalis historia*, II, 213.

[143] Plinio, *Naturalis historia*, II, 216.

[144] Cfr., ad esempio, Strabone, *Geografia*, XVI, i, 6, dove Seleuco è associato ai *Caldei* più famosi tra i "matematici".

ree del Sole,[145] avesse cioè accettato o scoperto egli stesso, estendendo la teoria di Eratostene, l'interazione gravitazionale con il Sole. In questo caso Seleuco sarebbe stato in condizione di giungere alla giustificazione dinamica dell'eliocentrismo che abbiamo ricostruito alla fine del §9.6 sulla base della testimonianza di Seneca. Plutarco scrive:

> doveva pensare [Timeo] che la Terra fosse stata progettata non confinata e stabile ma rivolgentesi e ruotante, come successivamente affermarono Aristarco e Seleuco, il primo assumendolo solo per ipotesi e Seleuco invece provandolo?[146]

Il verbo ἀποφαίνομαι, usato da Plutarco alla fine del passo, lascia adito a diverse possibili interpretazioni del contributo di Seleuco, ma la contrapposizione con l'"ipotesi" di Aristarco rende comunque chiaro che Seleuco aveva trovato degli argomenti nuovi a sostegno dei moti della Terra. Poiché nella letteratura classica non è stato mai trovato alcun altro argomento a favore dell'eliocentrismo oltre quello che abbiamo ricostruito nel §9.6 dal brano di Seneca, sembra ragionevole supporre che Seleuco avesse basato sia la sua teoria delle maree che la sua prova dell' eliocentrismo sull'ipotesi di un'interazione gravitazionale con il Sole.

Osserviamo che se si pensa (come suggerito dai passi di Plutarco e di Seneca) che l'attrazione lunare e la forza centrifuga agiscano contemporaneamente sulla Terra in versi opposti, non è difficile accettare che l'alta marea si verifichi contemporaneamente in due luoghi antipodali. La spiegazione dinamica dell'eliocentrismo appare quindi connessa alla possibilità di render conto teoricamente dell'andamento delle maree.

Cercando di ricostruire l'origine delle idee sulla gravità che sembrano presenti in Ipparco ci siamo imbattuti in Seleuco: uno scienziato probabilmente contemporaneo ma più anziano di Ipparco. Si può forse congetturare che Ipparco avesse accettato e sviluppato l'idea dell'interazione gravitazionale con il Sole, avanzata per primo da Seleuco. Tale congettura non è dimostrabile, ma è coerente con la testimonianza di Strabone che Seleuco fosse considerato un'autorità da Ipparco sull'argomento delle maree.[147]

[145] Naturalmente il Sole è in realtà essenziale anche per il ciclo mensile. Non sembra però che sia ovvio dedurre dalla relazione tra maree e fasi lunari l'influenza del Sole. Cfr., ad esempio, R. Descartes, *Le Monde... ou Le traité de la Lumière*, cap. 12, dove la relazione tra fasi lunari e maree, pur essendo chiaramente affermata, viene attribuita alla luce della Luna. Sembra invece veramente impossibile spiegare il ciclo annuale prescindendo dal Sole.

[146] Plutarco, *Platonicae quaestiones*, 1006C.

[147] Strabone, *Geografia*, I, i, 9. Per un'analisi di tutte le testimonianze su Seleuco e in particolare di un passo di Aezio ([DG], 383) che, a mio parere, ha fuorviato molti studiosi (tra i quali Galileo) cfr. [Russo 6].

9.9. *Precessione, comete e altro*

Se non si accetta la rotazione terrestre, è ben difficile spiegare il moto diurno, apparentemente rigido, delle stelle, senza ipotizzare tra esse un legame fisico. Sembra quindi molto probabile che un astronomo che non crede nella sfera delle stelle fisse sia anche un assertore dei moti della Terra.[148] Non a caso sia Aristotele che Tolomeo, che credono in una Terra immobile, credono anche in una sfera rigida delle stelle e la prima abolizione della sfera delle stelle fisse sembra risalire al primo assertore della rotazione terrestre: Eraclide Pontico.[149] Una conferma indiretta alla tesi che dopo Aristarco i moti della Terra non fossero stati abbandonati dagli astronomi ellenistici (e che, in particolare, la Terra non fosse stata considerata immobile da Ipparco) è quindi fornita dalle testimonianze sulle stelle fisse. Sappiamo, infatti, che Seleuco aveva ritenuto l'universo infinito (privo quindi della sfera delle stelle) e che Ipparco aveva anche ipotizzato che le stelle apparentemente fisse fossero in realtà mobili.[150] Nella compilazione di Gemino (probabilmente redatta intorno al 50 d.C.) la sfera delle fisse manca ancora, poichè le stelle sono considerate a distanza variabile.[151]

Il principale risultato di Ipparco riferito da Tolomeo è la scoperta della precessione degli equinozi.[152] La precessione è così lenta che i dati osservativi sui quali Ipparco poteva basarsi con certezza non potevano fornirgli che spostamenti di qualche

[148] Gli esempi di Aristarco, Copernico e Keplero mostrano che l'implicazione inversa è falsa. I moti della Terra possono cioè essere fatti coesistere con una sfera rigida delle stelle (che, anche non avendo più la funzione di spiegare il moto solidale della volta celeste, può essere conservata in omaggio alla tradizione). In epoca moderna la concezione di un universo infinito, con stelle mobili, nacque solo dopo che all'astronomia fu applicata una dinamica basata sul principio di inerzia.

[149] Secondo Aezio Eraclide Pontico aveva ritenuto l'universo infinito ([DG], 328, 5) e aveva sostenuto che ogni astro costituisse un mondo a sé, dotato, in particolare, di una propria atmosfera ([DG], 343a). Le stesse opinioni sono attribuite da Aezio anche a dei *Pitagorici*; potrebbe trattarsi degli stessi pitagorici che, come Iceta ed Ecfanto (cfr. sopra, p. 105), avevano sostenuto anche i moti della Terra.

[150] L'opinione di Seleuco è riferita da Aezio ([DG], 328a, 5). Plinio riferisce che Ipparco aveva compilato il suo catalogo stellare proprio perché i posteri potessero rilevare (oltre a eventuali apparizioni di *novae*) gli spostamenti, da lui congetturati, delle stelle fisse (*Naturalis historia*, II, 95). Ipparco realizzò in pieno il suo scopo. I primi moti delle stelle "fisse" furono infatti notati nel 1718 d.C. da Halley, che confrontò le coordinate da lui misurate di Sirio, Arturo e Aldebaran con quelle date da Tolomeo (coordinate che, come abbiamo visto, provenivano quasi certamente dal catalogo di Ipparco).

[151] Gemino, *Introduzione ai fenomeni*, i, 23.

[152] Cfr. Tolomeo, *Almagesto*, III, i, 192.

grado.[153] Ciononostante Ipparco (che sappiamo particolarmente severo nell'uso dei dati sperimentali[154]) aveva osato estrapolare da un minuscolo archetto l'esistenza di un moto circolare uniforme con un periodo di 26.000 anni. Se la sua fosse stata un' "astronomia dinamica", una qualsiasi trottola[155] avrebbe potuto dargli l'idea di cercare nei dati osservativi esistenza e velocità di questo moto.

Da un punto di vista fenomenologico le comete hanno poco in comune con i pianeti: l'aspetto è diverso e anche se si nota la periodicità di una cometa (il che non è certo facile) il suo moto resta comunque in massima parte non osservabile e diverso da quello di ogni altra cometa. È chiaro quindi che un'astronomia puramente descrittiva non può contenere una teoria delle comete. Se invece si elabora un'astronomia "dinamica" basata su qualche forma di "teoria della gravitazione" diviene naturale chiedersi se oltre ai pianeti esistano altri corpi in moto attorno al Sole, le cui orbite siano più allungate. Non a caso non esiste una teoria delle comete nell' *Almagesto* e la teoria moderna fu elaborata (da Halley) dopo la teoria della gravitazione. Seneca scrive:

> Questi infatti [Apollonio di Mindo] sostiene che i Caldei collocano le comete nel numero dei pianeti e conoscono le loro orbite.[156]

> Apollonio di Mindo sostiene un'opinione diversa: dice infatti che una cometa non deriva da molti pianeti ma che i pianeti sono [formati da] molte comete. "Una cometa non è," dice, "una falsa apparenza né un'estensione di fuoco in vicinanza di due stelle, ma un astro vero e proprio, come il sole e la luna. La sua forma non è racchiusa in un cerchio, ma più slanciata ed estesa in lunghezza". Peraltro la sua orbita non è [tutta] visibile: attraversa le regioni superiori dell'universo e appare solo quando arriva nel punto più basso della sua orbita.[157]

L'affermazione sulla *forma*, anche se Seneca non ne è forse consapevole, nella fonte riguardava l'orbita: Anche ammetten-

[153] Secondo Tolomeo, Ipparco aveva notato uno spostamento minore di 3 gradi (*Almagesto*, VII, ii, 15).

[154] Cfr., ad esempio, Tolomeo, *Almagesto*, IX, ii, 211.

[155] Le trottole erano un giocattolo molto diffuso (cfr., ad esempio, l'epigramma di Callimaco in *Anthologia Graeca*, VII, 89).

[156] "Hic [Apollonius Myndius] enim ait cometas in numero stellarum errantium poni a Chaldaeis tenerique cursus eorum" (Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, iv, 1). Ricordiamo che uno dei *Caldei* era stato Seleuco (cfr. sopra, n. 142).

[157] "Apollonius Myndius in diversa opinione est. Ait enim cometen non unum ex multis erraticis effici, sed multos cometas erraticos esse. Non est, inquit, species falsa nec duarum stellarum confinio ignis extentus, sed proprium

do, infatti, che una fonte astronomica si fosse soffermata a osservare che la coda di una cometa è "più allungata di un cerchio", si perderebbe il chiaro nesso logico con la frase successiva, che comunque implicherebbe la forma allungata dell'orbita. L'idea che i pianeti abbiano avuto origine dall'aggregazione di molti corpi più piccoli richiede una base teorica, poiché nessun fenomeno osservabile può dare direttamente informazioni al riguardo. Si trattava evidentemente di una teoria basata sull'idea dell'attrazione tra corpi.

L'idea che le comete percorressero orbite dello stesso tipo dei pianeti, che Seneca attribuisce ad Apollonio di Mindo, è riferita anche da Plinio, il quale, senza attribuire l'opinione a nessuno in particolare, afferma: "Alcune [comete] si muovono come i pianeti, altre restano immobili".[158]

Si può sospettare che la possibilità dell'immobilità sia stata aggiunta da Plinio, che può aver ritenuto poco credibile che tutte le comete, senza eccezione alcuna, condividessero con i pianeti il vizio del vagabondaggio. L'associazione tra comete e pianeti doveva però essere un'idea diffusa in epoca pretolemaica, poiché, oltre che in Plinio e in Seneca, la si può trovare anche in Manilio. Nel suo poema astrologico (scritto durante i regni di Augusto e Tiberio) Manilio accenna a tre diverse teorie sulle comete: secondo quella per noi più interessante, il Sole periodicamente avvicinerebbe a sé le comete e le lascerebbe allontanare, come fa anche con i pianeti Mercurio e Venere.[159]

9.10. *Tolomeo e Teone di Smirne*

I paragrafi precedenti suggeriscono che gli astronomi del II secolo a.C. (e in particolare Ipparco) fossero giunti a un "eliocentrismo dinamico", basato sul principio di inerzia e l'idea dell'equilibrio tra forza centrifuga e interazione gravitazionale con il Sole.

La maggiore difficoltà che si incontra nell'accettare questo quadro è l'assenza di qualsiasi traccia di tali idee nell' *Almagesto*. Lo stesso *Almagesto* fornisce però diversi elementi indiretti a supporto della ricostruzione proposta.

sidus cometae est, sicut solis ac lunae. Talis illi forma est, non in rotundum restricta sed procerior et in longum producta. Ceterum non est illi palam cursus; altiora mundi secat et tunc demum apparet cum in imum cursus sui venit" (Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, xvii, 1-2).

[158] "Moventur autem aliae errantium modo, aliae immobiles haerent" (*Nat. hist.*, II, 91).

[159] Manilio, *Astronomica*, I, 867-875.

Tra le conseguenze della frattura culturale che separa l'astronomia ellenistica da Tolomeo vi è la perdita dell'idea della relatività del moto. L'idea di poter scegliere il sistema di riferimento, che abbiamo trovato, tra gli altri, in Euclide, in Erofilo e nella fonte di Seneca,[160] è infatti completamente estranea a Tolomeo. Egli riporta delle opinioni che noi riconosciamo come relativistiche,[161] ma le intende semplicemente come espedienti per descrivere i moti osservati, senza alcuna conseguenza sulle sue concezioni dello spazio e del moto, che sono saldamente aristoteliche. Allo stesso modo medici come Rufo Efesio, pur riportando diligentemente i neologismi di Erofilo, non ne capivano più la natura.

Tolomeo non solo non usa la gravità (né alcuna altra idea dinamica) in astronomia, ma affronta anche l'argomento della sfericità della Terra in modo puramente geometrico-descrittivo, ignorando la spiegazione della forma sferica basata sulla gravità che era stata ben nota in epoca ellenistica.[162]

Su argomenti elementari quali la forma e l'immobilità della Terra Tolomeo usa come propria fonte esplicita Aristotele. Abbiamo visto che Erone aveva dovuto probabilmente rivolgersi alla stessa fonte nel porre le basi della sua esposizione della geometria. Anche l'affermazione di Tolomeo che contro l'attribuzione di moti alla Terra si possano produrre solo argomenti "terrestri", ma non astronomici,[163] sembra indicare che su questo argomento egli non potesse basarsi sulle opere astronomiche ellenistiche a sua disposizione.

Nell'*Almagesto* è citata (naturalmente come errata) l'opinione che le stelle "fisse" si muovano di moto rettilineo uniforme.[164] Tolomeo si riferisce al moto apparente diurno, ma si può sospettare che la sua fonte non esponesse un'idea così bizzarra, ma si riferisse al moto delle stelle ipotizzato da Ipparco sulla base di principi generali, per la cui verifica egli aveva chiesto l'aiuto dei posteri.

Tolomeo, sostenendo l'assenza di una teoria planetaria di Ipparco, afferma:

> Ipparco aveva semplicemente fatto degli elenchi di osservazioni planetarie riorganizzando i dati in modo più utile.[165]

[160] Cfr. sopra, pp. 106, 166 e 265.
[161] Cfr. sopra, p. 107.
[162] Tolomeo, *Almagesto*, I, iv, 14-16; per le spiegazioni della sfericità della Terra cfr. sopra, p. 273.
[163] Tolomeo, *Almagesto*, I, vii, 24.
[164] Tolomeo, *Almagesto*, I, iii, 11.
[165] Tolomeo, *Almagesto*, IX, ii, 210.

Il lavoro di adattamento di una teoria a una gran quantità di dati sperimentali richiede naturalmente molte "riorganizzazioni di dati", che non sono più comprensibili agli studiosi di epoca imperiale (che non elaborano più teorie sulla base di dati sperimentali, ma al più le usano). All'epoca di Tolomeo si pensava che una teoria dovesse essere esposta in modo puramente deduttivo; l'esposizione di Tolomeo è di questo tipo e abbiamo visto che Galeno per lo stesso motivo aveva criticato Erofilo a proposito della teoria delle pulsazioni.[166]

Il punto precedente suggerisce che le idee guida che abbiamo ricostruito nell'astronomia di Ipparco non fossero rimaste allo stadio di idee qualitative, ma che sulla loro base si fosse iniziato a elaborare una descrizione quantitativa dei moti planetari. Questa congettura sembra confermata dall'affermazione di Seneca che si fosse solo "incominciato a capire" il moto dei pianeti, da un'affermazione di Plinio dalla quale sembra potersi dedurre che lo studio dell'orbita di Marte fosse stato particolarmente difficile[167] e dall'insoddisfazione di Ipparco, trasmessaci da Tolomeo, per l'incompleto accordo tra teoria e dati sperimentali.[168]

Teone di Smirne (contemporaneo di Tolomeo) scrive:

> questo [il Sole] è il luogo dell'animazione del cosmo in quanto cosmo ed in quanto vivente, come se il Sole, caldissimo, fosse il cuore dell'universo, a causa del moto, della grandezza e del corso comune dei corpi attorno ad esso.[169] [...]
>
> Il centro della grandezza è il luogo freddo e immobile della Terra, ma il centro dell'animazione del cosmo, considerato come cosmo e come vivente, è il luogo del Sole, che è per così dire il cuore dell'universo, da dove si dice che la sua anima abbia origine per attraversare tutto lo spazio e diffondersi sino alle sue estremità.[170]

Le idee del ruolo particolare del Sole nell'animare il mondo e di una "simpatia cosmica" tra astri diversi sopravvivono a lungo e sono considerate di pura origine filosofica, il più delle volte di origine "stoica". Sono riportate, tra gli altri, anche da Macro-

[166] Cfr. p. 165.

[167] "Multa promi amplius circa haec possunt secreta naturae legesque, quibus ipsa serviat, exempli gratia in Martis sidere, cuius est maxime inobservabilis cursus,..." (Plinio, *Naturalis historia*, II, 77). Notiamo che le fonti di Plinio usavano il concetto di *legge di natura* e lo esprimevano con la terminologia che (anche attraverso scrittori come Plinio) hanno trasmesso all'età moderna.

[168] Tolomeo, *Almagesto*, IX, ii, 210.

[169] Teone di Smirne, *De utilitate mathematicae...*, 187, 14-18

[170] Teone di Smirne, *De utilitate mathematicae...*, 188, 2-7

bio, che le attribuisce però a Pitagora.[171] Potrebbe trattarsi di residui di un'astronomia dinamica, basata sulla gravitazione, non più capita.

Se si indaga sull'attribuzione di queste idee agli "Stoici" si scopre che essa dipende soprattutto dal fatto che, cercando la loro origine, si riesce a seguire una traccia fino a Posidonio (proprio come nel caso dell'analogia tra Terra e fionda). Osserviamo che Posidonio (che, oltre ad essere un costruttore di planetari, sembra anche l'ultimo studioso seriamente interessato alle maree[172]) dirige una scuola a Rodi poco dopo che Ipparco ha lavorato nella stessa città. Quanto all'attribuzione a Pitagora, oltre che con la generica tendenza dei neopitagorici a fargli risalire ogni conoscenza, potrebbe spiegarsi anche con la confusione tra Ipparco e Ippaso di cui abbiamo già parlato a p. 234.

[171] In particolare nel suo commento al *Somnium Scipionis* di Cicerone.
[172] Cfr. Strabone, *Geografia*, III, v, 9.

10. Il lentissimo recupero

10.1. *I "rinascimenti"*

La sopravvivenza del ricordo della scienza ellenistica fu assicurata da una serie di "rinascimenti" che, in aree geografiche diverse, riaccesero in alcuni periodi l'interesse per le antiche conoscenze. La ripresa degli studi avvenuta in epoca imperiale, della quale abbiamo già parlato, può essere forse considerata il primo di questi "rinascimenti". Il secondo risale alla prima metà del VI secolo d.C. ed ebbe tra i suoi maggiori esponenti Simplicio, Giovanni Filopono, Eutocio, Antemio di Tralle e Isidoro di Mileto. Ai fini del nostro discorso interessano solo poche osservazioni su questo risveglio culturale.

Questi autori hanno grande interesse per la scienza ellenistica: Eutocio non solo scrisse un commento ad alcune opere di Archimede e di Apollonio, ma credette anche di ritrovare una dimostrazione perduta di Archimede [1]; Giovanni Filopono (che, come Simplicio, è noto soprattutto come commentatore di Aristotele) si interessò anche di matematica e scrisse un'opera sull'astrolabio; abbiamo già visto (pp. 255-256) che Simplicio è l'unica nostra fonte esplicita sull'opera perduta di Ipparco sul moto dei gravi; Isidoro di Mileto (noto soprattutto per essere stato, con Antemio, l'architetto autore della basilica di Santa Sofia a Costantinopoli) curò un'edizione di opere di Archimede e scrisse, tra l'altro, dei commenti a Erone. [2] Anche la sua opera

[1] Cfr. Eutocio, *comm. a "Sulla sfera e sul cilindro" di Archimede*, 88-89 (ed. Mugler). L'attribuzione ad Archimede del frammento trovato da Eutocio è però molto dubbia.

[2] Tra le opere commentate da Isidoro vi era un trattato di Erone Περὶ

sui meccanismi meravigliosi[3] è evidentemente basata su fonti ellenistiche.

Gli intellettuali ricordati sono tutti condiscepoli, essendo stati allievi di Ammonio Ermia ad Alessandria; Antemio di Tralle, al quale Eutocio dedica i suoi commenti ad Archimede, ha Isidoro di Mileto come suo collaboratore e successore. In questo ambiente sono note alcune opere ellenistiche sconosciute agli studiosi alessandrini dei primi secoli della nostra era: ad esempio l'opera di Diocle sugli specchi ustori (che era stata ignota a Pappo, ma è citata da Eutocio) e, come abbiamo già visto, l'opera di Ipparco sulla gravità. Quest'ultima circostanza può essere dovuta a motivi geografici; lo spostamento del baricentro culturale da Alessandria a Bisanzio (dove lavorarono in particolare Antemio e Isidoro) può aver portato all' acquisizione di opere conservate in Oriente, che non erano mai entrate nella tradizione alessandrina; si può osservare che Simplicio (originario della Cilicia) dopo la chiusura della scuola filosofica di Atene si recò in Persia e che Giovanni Filopono dedicò una sua opera al patriarca di Antiochia.

Il livello di originalità scientifica degli autori di questo periodo è pressoché nullo. Il commento di Eutocio ad Archimede è per noi molto importante come unica fonte su diverse opere matematiche ellenistiche, ma non è mai originale. La trattazione di Antemio delle coniche mostra un livello matematico ben misero se confrontato con l'opera di Apollonio di Perga e Simplicio mostra di non capire l'opera di Ipparco.[4] La presenza in opere di quest'epoca di conoscenze a noi non note da

καμαρικῶν (*Sulle volte* o *Sulle cupole*; il titolo può riferirsi a entrambe le strutture), come sappiamo da un passo aggiunto da un copista al commento di Eutocio al trattato di Archimede *Sulla sfera e sul cilindro* ([Mugler: Archimède], vol. IV, 62, 1-4). Sappiamo dall'autore dell'interpolazione che Isidoro aveva inserito nel suo commento la descrizione di uno strumento per disegnare parabole: possiamo dedurne che Erone aveva trattato probabilmente anche la costruzione di volte (o cupole) di sezione parabolica. Potrebbe essere molto interessante per la storia dell'architettura ricostruire le vicende del trattato di Erone, oggi perduto. Si può sospettare che un'opera ellenistica di architettura commentata dal famoso costruttore di Santa Sofia (opera ammirata in particolare per la struttura della cupola) sia andata dispersa non quando il suo contenuto cessò di suscitare interesse a Bisanzio, ma quando cominciò a suscitarne altrove (cfr. avanti, in particolare n. 21).

[3] La parte rimastaci dell'opera di Antemio di Tralle (περὶ παραδόξων μηχανημάτων) è stata pubblicata in [MGM].

[4] Cfr. sopra, p. 256. In particolare Simplicio, seguendo Alessandro di Afrodisia, usa argomenti della filosofa naturale aristotelica per criticare l'affermazione di Ipparco che il peso di un grave diminuisce con il suo avvicinarsi al centro della Terra.

altra fonte ha fatto tuttavia datare spesso al VI secolo scoperte scientifiche[5] o tecnologiche.[6]

Il successivo "rinascimento" medievale è quello che è stato chiamato "Rinascimento islamico". Nell'Islam l'interesse per la scienza inizia nell' VIII secolo, in seguito alla rivoluzione abbaside, con i califfi al-Manṣūr e Hārūn-ar-Rashīd, e si sviluppa soprattutto nel IX secolo con il califfo al-Ma'mūn. Cominciano allora le traduzioni in arabo dei trattati scientifici ellenistici sopravvissuti. Una copia degli *Elementi* di Euclide fu richiesta a questo scopo dal califfo (l'episodio è attribuito sia ad al-Manṣūr che ad al-Ma'mūn) all'imperatore bizantino. Nello stesso periodo si ha un ritorno di interesse per la scienza, forse stimolato dal risveglio islamico, anche a Bisanzio. Tra le tante edizioni bizantine del IX secolo vi sono anche molte edizioni di opere scientifiche, come l'edizione di Archimede (basata su quella di Isidoro) cui abbiamo già accennato a p. 71 (n. 53).

Gli scienziati islamici nel loro lavoro (cui dobbiamo, in misura notevole, la sopravvivenza della scienza) sono lontani dalla metodologia scientifica del primo ellenismo e si dedicano soprattutto all'esegesi di opere scientifiche del periodo imperiale: in particolare l'opera astronomica di Tolomeo e quella medica di Galeno furono considerate le massime autorità nei rispettivi campi. L'ottica fu recuperata soprattutto ad opera di Ibn Sahl (la cui opera rimastaci risale circa al 983) e Ibn al-Haytham (Alhazen, circa 965 – circa 1039). Ambedue questi autori si occupano non solo di specchi di varia forma, ma anche di lenti. Alhazen, nella sua *Ottica*, dopo aver trattato altri argomenti in stretta aderenza all' *Ottica* di Tolomeo, espone la teoria delle lenti sferiche.[7] Su un punto egli rivendica la propria superiorità sull'ottica greca: egli ha scoperto che la luce non è emessa, ma solo ricevuta dall'occhio! In seguito

[5] Vogel scrive che Antemio "nella sua opera sugli specchi ustori superò di molto Apollonio" ([Vogel], p. 791). Questa affermazione è evidentemente basata sulla circostanza che in un frammento di Antemio è usata la proprietà focale della parabola, non enunciata nelle *Coniche* di Apollonio. Dopo la pubblicazione di [Diocle, Toomer] abbiamo la prova che si trattava di una conoscenza risalente all'epoca ellenistica (oltre che probabilmente ben nota ad Apollonio). Bastava però notare l'abisso che separa metodologicamente i due autori per escludere non solo che Antemio avesse potuto superare di molto Apollonio, ma anche che la proprietà focale potesse essere una sua scoperta.

[6] Secondo F.G. Maier Antemio di Tralle "scoprì addirittura il principio della macchina a vapore" ([Maier], p. 73).

[7] La teoria è esposta nel VII libro del *Libro di Ottica* (*Kitāb al-Manāẓir*) di Alhazen, che è stato pubblicato in [Rashed GD]. Per la stretta dipendenza di Alhazen, su argomenti precedenti, dal trattato di Tolomeo cfr. [Mark Smith]. L'opera di Tolomeo, come abbiamo già ricordato nel §3.1, ci è giunta priva della parte finale e si interrompe dopo la trattazione della rifrazione attraverso superfici piane e cilindriche. Precedentemente era stata considerata la riflessione su specchi piani e sferici.

a questa "scoperta" il concetto di "raggio visuale" fu eliminato dall'ottica islamica. È interessante notare che mentre Alhazen, come Tolomeo, non aveva applicato all'ottica la teoria delle coniche, Ibn Sahl lo aveva fatto sistematicamente, considerando non solo specchi parabolici ed ellittici, ma anche lenti (piano-convesse e biconvesse) limitate da iperboloidi.[8]

L'interesse per la scienza ellenistica è contemporaneo allo sviluppo di diverse industrie, tra le quali quelle tessile, cartaria, metallurgica e cantieristica. Anche l' "alchimia" è strettamente connessa a procedimenti produttivi: gli alambicchi, ad esempio, erano usati in batterie per produrre acqua di rose su scala industriale.[9] L'agricoltura, molto più sviluppata di quella contemporanea dell'Occidente cristiano, si avvale in particolare di impianti di irrigazione basati sull'uso di fonti naturali di energia.[10]

La relazione tra scienza e tecnologia, in genere negata prima dell'età moderna, è chiara ai pensatori islamici. Ibn Sīnā (Avicenna, morto nel 1037) elenca come scienze pratiche dipendenti dalla geometria: la geodesia, la scienza degli automi, la scienza del movimento dei corpi pesanti, la scienza dei pesi e delle bilance, la scienza degli strumenti di misura, la scienza delle lenti e degli specchi e la scienza delle condutture d'acqua.[11] Tra i prodotti tecnologici ellenistici che interessano gli scienziati islamici, accanto agli automi (nell'Islam una corporazione di costruttori di automi fu fiorente per secoli) vi sono anche i "meccanismi a orologeria".[12]

Nel XII e XIII secolo la penisola iberica e la Sicilia, riconquistate all'Islam, insieme all'Italia meridionale, rimasta da sempre in contatto con Costantinopoli, costituiscono degli importanti punti d'incontro tra la cultura europea e la tradizione ellenistica. Negli stati sorti dalla "Reconquista" è possibile trovare infatti opere ellenistiche e studiosi arabi in grado di capirne, almeno in parte, il contenuto. Le traduzioni arabe di Euclide, di Galeno e di Tolomeo cominciano a diffondersi in Europa. Un altro canale è aperto violentemente dalla IV crociata, con il saccheggio

[8] Nel *Libro sugli strumenti ustori* (*Kitāb al-ḥarrāqāt*), scritto tra il 982 ed il 984. L'opera di Ibn Sahl è stata trovata da R. Rashed in un manoscritto conservato a Teheran e pubblicata in [Rashed GD]. Cfr. anche [Rashed PA].

[9] Cfr. [Holmyard Alchemy], p.49.

[10] Per la diffusione nell'Islam delle ruote idrauliche (a Bassora vi era anche un mulino a marea) e dei mulini a vento cfr., ad esempio, [Forbes EM], pp. 624-625.

[11] Avicenna, *Trattato sulla saggezza (resâ 'il fî 'l-hikmet), Costantinopoli, 1298 dell'egira*, p. 76. Il passo è citato, tradotto e discusso in [Carra de Vaux: Filone, Pneum.], p.13.

[12] Price ha notato la stretta affinità tra la macchina di Anticitera (cfr. sopra, §4.7) e un analogo meccanismo descritto da al-Bīrūnī attorno al 1000 d.C. ([Price: gears], pp. 42-43).

di Costantinopoli del 1204 e la successiva fondazione dell'impero latino, che provocò tra l'altro un'importante dispersione di manoscritti conservati a Bisanzio.[13]

Tra i ritrovati tecnologici che si diffondono in Europa nel XIII secolo, in quello che possiamo considerare un altro *rinascimento* (il primo che interessi l'Europa occidentale) vi sono, oltre alle lenti di cui abbiamo già parlato,[14] anche gli orologi meccanici.[15] Il più antico documento al riguardo conservato fino a oggi è forse un disegno nel taccuino di appunti di Villard de Honnecourt (1270 circa)[16]: si tratta di un angelo che indica col dito la posizione del sole, grazie a un dispositivo a orologeria che compensa la rotazione terrestre. Lo stesso taccuino comprende, tra l'altro, il disegno di una "fontana di Erone", l'illustrazione relativa al capitolo 59 della *Pneumatica* di Filone di Bisanzio,[17] macchine per il sollevamento di pesi, una filettatrice "eroniana" di viti, macchine belliche ellenistiche, automi progettati a scopo ludico e una sega idraulica automatica. Il congegno a orologeria è basato su demoltipliche[18] e un meccanismo a scappamento.[19]

Al XIII secolo risalgono anche le prime tavole astronomiche europee: le famose *Tavole alfonsine*, compilate in Spagna nel 1252 da studiosi cristiani, ebrei e musulmani per incarico di Alfonso X di Castiglia. Poco dopo appare in Europa occidentale anche la polvere da sparo.[20]

[13] Cfr., ad esempio, [Vogel], p. 728.

[14] Sulle lenti e altre novità tecnologiche apparse nel XIII secolo (o delle quali si ha almeno notizia a quell'epoca), cfr. sopra, pp. 151-153.

[15] Credo che la storia degli orologi meccanici e, più in generale, dei "meccanismi a orologeria" (che includono i planetari mobili ed i calendari automatici) debba ancora essere scritta. Price, che è stato il massimo specialista dell'argomento, ha notato sia la stretta analogia tra i planetari ellenistici e una serie di orologi astronomici cinesi, datati tra il II ed l'XI secolo d.C., sia il ripetersi degli stessi particolari (come la forma dei denti delle ruote dentate) dalla macchina di Anticitera ai meccanismi islamici, agli orologi europei del XIV secolo ([Price: gears], pp. 42-43; [Price: science], cap. 2). Né lui né altri hanno però tentato, a mia conoscenza, una ricostruzione storica unitaria, che includa sia i meccanismi bizantini sia i vari "precursori" del Medio Evo europeo. Price ha sostenuto che la storia dell'orologio sia caratterizzata dall' occasionale apparire di geni che reinventavano oggetti con le stesse caratteristiche, seguiti ogni volta da periodi di perdita totale delle conoscenze (cfr. [Price: gears], p. 61).

[16] [Villard de Honnecourt].

[17] Come osservato da Prager in [Prager: Filone], pp. 26-27.

[18] Osserviamo che Erone, descrivendo le demoltipliche, osserva sistematicamente che questi dispositivi rallentano il movimento di un fattore eguale al vantaggio meccanico (Erone, *Meccanica*, II, iii, 21-28).

[19] In Cina vi erano orologi meccanici con meccanismi a scappamento almeno dall'XI secolo.

[20] La polvere da sparo è attribuita in genere ai Cinesi, che la conoscevano da secoli quando fu introdotta in Europa occidentale (dove sembra sia arrivata

Le conoscenze scientifiche daranno per secoli il primato alla Spagna e al Portogallo. Innanzitutto nella navigazione. Nel XIV secolo gli spagnoli e i portoghesi, grazie alla geografia matematica appresa dagli Arabi, erano ancora i soli europei in grado di disegnare carte geografiche e nautiche attendibili (come mostrato dalla *Carta catalana* del 1375). Il principe portoghese Enrico il Navigatore (1394-1460) fu tra i primi a sostenere anche l'uso di metodi astronomici per la navigazione in mare aperto.

10.2. *Il Rinascimento*

All'inizio del Quattrocento un flusso di scritti greci provenienti da Costantinopoli si diresse in Italia (e da qui nel resto d'Europa), provocando quello che è detto il *Rinascimento* per antonomasia. Duecentotrentotto furono, ad esempio, i manoscritti portati da Giovanni Aurispa nel viaggio del 1423.[21]

Gli intellettuali rinascimentali non erano in grado di capire le teorie scientifiche ellenistiche, ma, come bambini intelligenti e curiosi che entrano per la prima volta in una biblioteca, erano attratti da singoli risultati e in particolare da quelli illustrati nei manoscritti con disegni, come le dissezioni anatomiche, la prospettiva, gli ingranaggi, le macchine pneumatiche, la fusione di grosse opere in bronzo, le macchine belliche, l'idraulica, gli automi, la ritrattistica "psicologica", la costruzione di strumenti musicali.

Il più famoso tra gli intellettuali attratti da tutte queste "novità" è Leonardo da Vinci, che non solo si interessò a tutti gli argomenti prima elencati, ma ne fu anche indotto a tentare (senza successo, per la verità) lo studio delle opere di Archimede. Risultati molto migliori egli li ebbe mettendo in pratica alcune del-

da Bisanzio). Non vi era però forse troppa differenza tra la polvere da sparo (salnitro, zolfo e carbone) e il "fuoco greco" (salnitro, zolfo e nafta; questa almeno sembra la composizione affermata in un trattato del IX secolo; cfr., ad esempio, [Ensslin], pp. 339-340). Il "fuoco greco" è di solito considerato un'invenzione del VII secolo d.C., ma Ensslin (l.c.) dà un elenco di fonti che ne attestano l'uso nel V secolo d.C. L'eventuale relazione con armi usate già in epoca ellenistica (cfr. sopra, p. 134) non è chiara.

[21] L'Aurispa, oltre e più che un dotto, fu uno dei numerosi mercanti che all' inizio del Quattrocento si dedicarono al lucroso traffico di manoscritti tra Costantinopoli e l'Italia. Possiamo esser certi che una frazione dei libri allora giunti in Italia finì col perdersi nell'arco di qualche generazione. Notiamo incidentalmente che tra le idee elaborate in quegli anni dagli artisti italiani, accanto alla prospettiva, vi fu anche quella di poter aumentare le dimensioni delle cupole costruendole non semisferiche ma a sezione parabolica (o approssimativamente tale). Cfr. sopra, n. 2 (pp. 285-286).

le idee contenute nelle antiche opere, soprattutto quando poteva usare le sue straordinarie doti di osservatore e pittore: ad esempio tentando di recuperare l'anatomia con la dissezione di cadaveri e compiendo osservazioni nel campo dell'idraulica.

Da qualche tempo Leonardo non ci appare più isolato, ma si è riusciti a inquadrarlo come il più rilevante esponente di un ambiente in cui da tempo si condividevano gli stessi interessi, si guardavano gli stessi libri e si realizzavano disegni analoghi.[22] Molti degli interessi tecnologici di Leonardo erano stati condivisi, nella prima metà del secolo XV, da Mariano Taccola, molto interessato, in particolare, alle opere di pneumatica e tecnologia militare di Filone di Bisanzio. Alla stessa epoca risale quella che probabilmente è la prima traduzione di un'opera scientifica in una lingua europea moderna: la traduzione italiana della *Pneumatica* di Filone di Bisanzio contenuta nella prima parte del manoscritto anonimo *Macchine idrauliche, di guerra, etc...*[23] Alla seconda metà del secolo risale il *Trattato di architettura, ingegneria e arte militare* di Francesco di Giorgio Martini, nel quale si possono vedere disegni di ruote idrauliche alimentate da condotte forzate, pompe aspiranti e prementi, viti senza fine, meccanismi a cremagliera e molti altri elementi della tecnologia ellenistica.[24]

Mentre Taccola e Francesco di Giorgio si erano concentrati soprattutto su Filone di Bisanzio e Vitruvio, Leonardo, come altri ingegneri del tempo, ebbe anche molto interesse per Erone. Spesso nel passato le stesse persone che snobbavano i congegni di Erone, considerandoli inutili giocattoli, si entusiasmavano poi ai disegni tecnici "avveniristici" di Leonardo, che, quando non ne erano copie, ne erano spesso fortemente ispirati, come nel caso di torchi, demoltipliche, macchine per filettare viti, magli automatici, "ruote a vento", sifoni, "fontane di Erone", apparecchi mossi dall'aria calda ascendente, livelle ad acqua...[25] In altri casi, come in quelli delle catene di trasmissione a maglie piane e della balestra automatica, la fonte di Leonardo è Filone di Bisanzio.

[22] Questo approccio a Leonardo risale a [Gille IR].

[23] Il manoscritto continua con estratti di Vitruvio e compilazioni di vario tipo, tra le quali una sulle sostanze incendiarie, e termina con la trascrizione dell'opera *De ingeniis* di Taccola, basata sugli scritti di Filone di Bisanzio e dedicata alla pneumatica e alla tecnologia militare. Il contenuto del manoscritto (conservato nel British Museum come Additional Manuscript 34113) è descritto in [Prager: Filone], pp. 112-113.

[24] Su Taccola e Francesco di Giorgio, entrambi senesi, si può vedere [Prima di Leonardo].

[25] Per rendersene conto basta naturalmente confrontare i disegni. Pochi lo hanno fatto per la scarsa diffusione delle opere di Erone.

L'impressione, spesso ripetuta, che Leonardo riuscisse con il suo genio a trascendere la cultura del suo tempo[26] è ben giustificata. Non si trattava però di un fantascientifico viaggio nel futuro, ma del tentativo di immergersi in un lontano passato. Nei manoscritti di Leonardo sono raffigurati in genere oggetti irrealizzabili ai suoi tempi, giacché mancava la tecnologia corrispondente. Questa circostanza non dipendeva però da una eccezionale capacità del genio di Leonardo di "divinare" il futuro, ma, più semplicemente, dal fatto che all'origine di quei disegni, come di quelli di Francesco di Giorgio, vi erano altri disegni, risalenti a un'epoca in cui la tecnologia era stata ben più sviluppata.

Spesso le spiegazioni scritte da Leonardo non sono adeguate ai suoi disegni. Nel *Codice Leicester* è disegnata una macchina a vapore, ma la descrizione la interpreta come un misuratore della quantità di vapore acqueo. Bertrand Gille a questo proposito scrive:

> Il disegno è assolutamente sorprendente. Si potrebbe giurare, se non vi fossero sulla stessa pagina le spiegazioni, che si tratti effettivamente di una macchina a vapore primitiva. Ma non è nulla di tutto ciò [...] Esistono parecchie figure di questo apparato, curioso soprattutto per la sua rassomiglianza con apparecchiature che verranno elaborate molto tempo più tardi.[27]

Il lungo tempo occorso per elaborare l'interpretazione corretta di disegni che già Leonardo sapeva eseguire non sembra faccia sorgere alcun sospetto in Gille.

La conoscenza di molti elementi della tecnologia alessandrina penetrò in Europa soprattutto attraverso le opere di Filone e di Erone. Mentre però alcune conoscenze tecnologiche, quali la forma dei vari tipi di ingranaggi, erano facilmente ricostruibili dalle illustrazioni contenute nei manoscritti, in altri casi le cose non erano altrettanto semplici. Nel caso delle pompe disegnate da Francesco di Giorgio, Gille scrive:

> I disegni che Francesco ci presenta di pompe aspiranti e prementi e di una sega idraulica mostrano in ogni caso che egli si imbatté nelle stesse difficoltà incontrate dai suoi predecessori, vale a dire l'impossibilità di una realizzazione corretta. Soltanto lo sviluppo della metallurgia, della tornitura dei metalli, dell'uso di lubrificanti adeguati poteva permettere [...][28]

[26] Nell'ultima edizione (15ª) dell' *Encyclopædia Britannica*, alla voce *Leonardo da Vinci* è scritto che "his notebooks reveal [...] a mechanical inventiveness that was centuries ahead of his time".

[27] [Gille IR], p. 225.

[28] [Gille IR], pp. 134-135.

Notiamo che l'importanza della lubrificazione per le pompe era stata sottolineata anche da Vitruvio,[29] che però era stato sfortunatamente avaro di particolari al riguardo. Ben più grave della mancanza di lubrificanti adeguati era il basso livello della metallurgia: molti dei disegni ellenistici (e delle loro riproduzioni rinascimentali) riguardavano infatti macchine di metallo, ma per la loro realizzazione mancava una conoscenza adeguata delle tecniche di fusione, tornitura e molatura. Ludovico Sforza chiamò a Milano Leonardo con l'incarico di fondere una grande statua in bronzo, ma la realizzazione del "colosso" rimase un sogno inutilmente inseguito per molti anni. L'interesse degli Sforza per lo sviluppo delle tecniche di fusione non era solo estetico: molti progressi, in particolare nel campo dell'artiglieria, erano infatti bloccati dall'incapacità di riprodurre l'antica tecnologia che aveva permesso un tempo di realizzare "colossi" con colate di metallo fuso.[30]

Anche se la metodologia scientifica rimaneva ben al di là delle possibilità di comprensione degli intellettuali rinascimentali, vi fu un diffuso interesse per alcune teorie scientifiche e in particolare per quelle essenziali per la navigazione, come la geografia matematica e l'astronomia.

Già nel 1406 Jacopo Angelo aveva tradotto in latino la *Geografia* di Tolomeo. Più tardi riuscì a portare in Europa una copia dell'opera da Costantinopoli. La *Geografia* fu infine pubblicata a stampa nel 1477. Per apprezzare l'importanza di questa pubblicazione basta confrontare una carta geografica precedente (escludendo quelle arabe o iberiche, di cui già si è detto) con una successiva a questa data: ad esempio la *Hereford Mappa Mundi*, disegnata intorno al 1300 in Inghilterra (in cui il mondo, privo di oceani e affollato da continenti irriconoscibili separati da sottili linee d'acqua, è rappresentato come un disco centrato in Gerusalemme) con la carta incisa da J. Schnitzer a Ulm nel 1492.

La riscoperta della geografia matematica rese di nuovo attuale una vecchia idea ellenistica: quella di raggiungere le Indie navigando verso Occidente.[31] Sette anni dopo la pubblicazione della *Geografia* Colombo espose il suo progetto al Re del Portogallo e otto anni più tardi tentò coraggiosamente l'impresa.

[29] Vitruvio, *De architectura*, X, vii, 3.

[30] Non sappiamo a quali fini fosse stata sviluppata originariamente questa tecnologia; si può però esser certi che nella Rodi del III secolo a.C. l'interesse per la tecnologia navale non fosse minore di quello per le grandi statue ornamentali; cfr. sopra, p. 127.

[31] Tentativi di circumnavigazione della Terra sono ricordati da Strabone (cfr. sopra, p. 126, n. 37).

Il successivo importante progresso della geografia matematica consistette nel ritrovamento, nel Cinquecento, della misura di Eratostene del diametro della Terra.[32]

Contemporaneamente a quella della geografia matematica, vi fu anche una riscoperta dell'antica astronomia. Girolamo Fracastoro e G. B. Amici riproposero, l'uno indipendentemente dall'altro, la teoria delle sfere omocentriche di Eudosso di Cnido. La teoria eliocentrica di Aristarco fu ripresa per primo da Copernico nel *De revolutionibus orbium caelestium* (pubblicato nel 1543). La dipendenza di Copernico da Aristarco era del tutto evidente ai contemporanei, che potevano occuparsi di matematica o di astronomia solo con l'attento studio delle opere ellenistiche ritrovate. È interessante notare che Copernico, nel riproporre l'antico eliocentrismo, superò allo stesso tempo anche la concezione aristotelica della gravità, facendo propria la teoria policentrica (capace di spiegare la forma sferica di Terra, Sole e Luna) che abbiamo trovato riferita da Plutarco.[33]

Copernico fece molto di più che superare il geocentrismo di Tolomeo (e le sue idee sulla gravità) riprendendo l'idea eliocentrica di Aristarco. Dal punto di vista scientifico il punto essenziale è che Copernico fu in grado di elaborare un algoritmo, basato su un sistema di epicicli, per calcolare il moto apparente dei pianeti: egli cioè riuscì per primo a ricostruire l'astronomia matematica di Tolomeo.[34] Tale "ricostruzione" era in realtà lontana dall'essere banale, poiché nell'*Almagesto* non vi erano indicazioni su come elaborare l'algoritmo di cui era descritto l'uso, algoritmo in cui d'altra parte era divenuto necessario modificare alcuni parametri per tener conto degli errori che si erano accumulati nei quattordici secoli trascorsi.

Questo fondamentale lavoro di recupero, per la scelta di accettare l' *ipotesi* di Aristarco, assunse lo strano aspetto di una battaglia culturale contro Tolomeo. L'avversario di Copernico non era in realtà Tolomeo, ma l'immagine che del suo sistema si era fatta la cultura europea. Il sistema tolemaico non era stato infatti compreso nella sua natura di algoritmo per la previsione dei moti dei pianeti, poiché nessuno prima di Copernico

[32] Quella fu infatti con ogni probabilità la base della misura del grado di meridiano adottata nel corso del XVI secolo dai navigatori portoghesi. Cfr. [Taylor], p. 558.

[33] Cfr. N. Copernico, *De revolutionibus*..., I, 9. Per l'antica teoria policentrica della gravità (e i passi di Plutarco in cui è esposta) cfr. sopra, pp. 274-275. Ricordiamo che Copernico cita Plutarco nella prefazione dell'opera.

[34] Questo punto è stato sottolineato da Neugebauer ([Neugebauer, ESA], pp. 241-242), che però è del tutto disinteressato al significato ideologico della "rivoluzione copernicana".

era stato in grado di usarlo in questo modo. Il nome di Tolomeo era stato usato per avvalorare una complessa cosmologia, quale possiamo vedere in Dante, ottenuta sovrapponendo alcuni elementi dell'astronomia tolemaica (come l'uso delle circonferenze per descrivere i moti e il geocentrismo) a elementi della filosofia naturale aristotelica e della tradizione religiosa cristiana. La battaglia culturale per l'eliocentrismo assunse quindi un enorme significato ideologico, giacché si trattava di superare questa cosmologia e, riconoscendo nella Terra un "corpo celeste", di affermare in realtà la natura "terrena" dei fenomeni astronomici.

Kuhn ha sottolineato come l'affermarsi della "rivoluzione copernicana" abbia permesso, nel XVI secolo, di osservare l'apparizione di nuove stelle e il moto delle comete attraverso lo spazio planetario. Si tratta di fenomeni che, pur essendo visibili a occhio nudo, erano stati ignorati finché si era accettato il "paradigma" tolemaico, con essi incompatibile.[35]

Nel Cinquecento vi fu grande interesse anche per altri elementi della cultura ellenistica. Ripresero, in particolare, gli studi di anatomia, soprattutto a opera di Vesalio e di Falloppio. Come per l'astronomia, il maggior risultato fu la riscoperta, grazie ai manoscritti bizantini, della scienza ellenistica del III secolo a.C., che fu opposta alla tradizione risalente all'età imperiale, in parte già acquisita attraverso gli Arabi di Spagna. Come Tolomeo fu superato usando Aristarco, così Galeno fu superato tentando il recupero di Erofilo. Falloppio, che oltre a scoprire le "tube di Falloppio" (già descritte da Erofilo) scoprì anche, tra l'altro, l'"acquedotto di Falloppio", cioè il foro della rocca temporale attraversato dal nervo facciale (anch'esso già descritto da Erofilo) scrisse:

> Herophili authoritas [sic] apud me circa res anatomicas est Evangelium. [...] Quando Galenus refutat Herophilum, censeo ipsum refutare Evangelium medicum.[36]

Sembra strano che Falloppio possa essere arrivato a tali convinzioni conoscendo Erofilo, come noi, solo attraverso tarde citazioni, soprattutto di Galeno. È naturale il dubbio che Fallop-

[35] Cfr. [Kuhn SSR], p. 145; [Kuhn CR], pp. 264-268. Poiché in epoca ellenistica erano state osservate delle *novae* ed erano state descritte le orbite allungate delle comete (cfr. sopra, n. 150 a p. 279, per le *novae*, e pp. 280-281 per le comete), abbiamo un ulteriore elemento a sostegno della tesi che il "paradigma tolemaico" si fosse imposto solo in epoca imperiale. Kuhn non sembra essersi accorto di questa conseguenza della sua osservazione.

[36] Ambedue i passi, tratti dalle *Observationes anatomicae*, sono in [von Staden], p. xi.

pio possa avere scoperto sia le trombe uterine sia molte altre strutture anatomiche direttamente negli scritti di Erofilo.[37] Se nel XVI secolo fosse sopravvissuta qualche opera di Erofilo non sarebbe stato certo nell'interesse del fortunato medico possessore di un tale tesoro divulgarne il contenuto facendola pubblicare. Anche se è molto difficile trasformare dubbi specifici di questo tipo in prove, non vi sono motivi per credere che tutte le opere ellenistiche disponibili nel Rinascimento si siano conservate fino a oggi, né che quelle conservate siano state tutte stampate o siano comunque note.

Un'annotazione di Leonardo nel *Codice parigino L* contiene la frase "Borges ti farà avere Archimede del vescovo di Padova e Vitellozzo quello da il borgo a San Sepolcro".[38] Alcuni dei libri letti da Leonardo su Archimede dovevano contenere informazioni oggi non più disponibili. Leonardo descrive e disegna un "cannone a vapore" (l'*architronito*), altrimenti sconosciuto, attribuendone l'invenzione ad Archimede[39] e mostra di conoscere notizie biografiche, riguardanti sia un soggiorno di Archimede in Spagna[40] che particolari sulla sua sepoltura,[41] sui quali non siamo altrimenti informati.

Anche altre informazioni contenute nei manoscritti di Leonardo sembrano basate su fonti non più disponibili. Sarebbe interessante, ad esempio, scoprire dove Leonardo avesse letto della possibilità di ingrandire gli oggetti lontani, costruendo uno strumento utile, in particolare, per osservare le macchie lunari.[42] Si può congetturare che Leonardo avesse usato la stessa fonte che avrebbe permesso qualche tempo dopo a Girolamo Fracastoro (nel 1538) di essere un po' più preciso, accennando all'uso di due lenti; anche perché Fracastoro (medico, poeta e umanista) accenna anch'egli all'uso dello strumento per osser-

[37] Scritti di Erofilo erano ancora citati in modo apparentemente diretto a Costantinopoli nel VI secolo (cfr. [von Staden], p. 68) e opere di medici della sua scuola, in particolare di Demostene Filalete, erano ancora disponibili nel secolo XIV (cfr. [von Staden], p. 573).

[38] *Codice L, 2a*; cfr. [Leonardo], vol. II, p. 428.

[39] Il brano di Leonardo sull'architronito è riportato da Gille, che scrive: "Esperimenti del genere [...] portarono Leonardo, con qualche altro autore, ad immaginare quell'arma da guerra che egli chiama 'architronito', di cui attribuisce, non si sa bene perché, la paternità ad Archimede. Sembra proprio, infatti, che non si tratti altro che del famoso esperimento seicentesco [...]" [Gille IR], pp. 225-226). I commenti sono lasciati al lettore.

[40] *Codice Ash. II, 12 b*; [Leonardo], vol. II, p. 451. Viaggi di Archimede dopo il suo ritorno dall'Egitto (dei quali nessuna fonte oggi disponibile dà notizia) sono menzionati ancora da J. Torelli, nella biografia dello scienziato premessa alla sua edizione delle opere di Archimede (Oxford, 1792).

[41] *Codice Brit. Mus. 279 b*; [Leonardo], vol. II, p. 446.

[42] *Codice parigino E, 15b*; [Leonardo], vol. II, pp. 140-141.

vare la luna.[43] Poiché, come abbiamo notato a p. 153, la possibilità di costruire strumenti di questo tipo sembra già nota, nel XIII secolo, a Ruggero Bacone, si può pensare che le fonti di Leonardo e di Fracastoro (coincidenti o meno) fossero piuttosto antiche. È certo comunque che né Leonardo né Fracastoro riuscirono né a descrivere in dettaglio i cannocchiali di cui parlavano né, tanto meno, a costruirli.

Anche il progresso della tecnologia meccanica continuò nel XVI secolo, costruendo per diletto vari meccanismi semoventi (dai quali si originarono oggetti quali gli orologi con automi) e riproducendo antichi congegni, come il differenziale, destinati ad avere grande interesse per la tecnologia produttiva.[44]

Nonostante tutti i progressi descritti, il quadro generale rimase prescientifico. Si riuscirono a recuperare dai manoscritti bizantini singoli risultati scientifici, ma non la metodologia che aveva consentito di ottenerli. Mentre lo studio degli scritti ellenistici portava con sé la riscoperta di elementi della scienza esatta e della tecnologia, dell'anatomia, della filologia e della possibilità dei viaggi oceanici (guidando così l'Europa verso la civiltà moderna), il quadro concettuale lo si chiedeva genericamente agli "Antichi". Sorsero scuole neoplatoniche e neoaristoteliche e si teorizzò lo studio di tutti i "classici": l'opera di Plinio fu stampata e letta insieme alle opere scientifiche ellenistiche senza alcuna coscienza del suo livello abissalmente diverso. In breve si accettò l'idea (risalente all'epoca imperiale) di una civiltà "greco-romana", ottenuta sovrapponendo culture del tutto diverse.

La riscoperta di manoscritti bizantini da parte dell'Occidente non terminò con la conquista turca di Bisanzio del 1453, ma continuò nei secoli successivi. Abbiamo già ricordato a p. 215 l'importanza per la filologia del ritrovamento, nel XVIII secolo,

[43] Fracastoro scrive in particolare: "Per dua specilla ocularia si quis perspiciat, alteri altero superposito, maiora multo et propinquiora videbit omnia" (G. Fracastoro, *Homocentrica sive de stellis*, II, viii; l'accenno alla Luna è in III, xxiii; si tratta della stessa opera nella quale il Fracastoro ripropone la teoria delle sfere omocentriche di Eudosso di Cnido).

[44] Il primo uso del differenziale nella produzione (nelle macchine filatrici) seguì di secoli l'introduzione del meccanismo in orologi astronomici. Il dubbio che si sia trattato di una autonoma "reinvenzione" moderna e non del recupero di conoscenze ellenistiche sembra dissolversi alla luce della circostanza che negli orologi astronomici del XVI secolo il differenziale fu usato per mediare tra il mese sinodico e il mese siderale, cioè esattamente allo stesso scopo per il quale era stato usato nella macchina di Anticitera ([Price: gears], pp. 60-61). Poiché oggi sappiamo dell'esistenza dei differenziali antichi solo grazie all'archeologia subacquea del XX secolo, abbiamo un'ulteriore prova del fatto che nel Cinquecento fossero ancora disponibili conoscenze sulla tecnologia classica successivamente perdute.

di antichi scolii all'Iliade in un codice conservato a Venezia. Oltre Venezia, che aveva sempre mantenuto rapporti privilegiati con Bisanzio, un'altra possibile fonte di manoscritti era rappresentata dai centri bizantini passati sotto il dominio veneziano. Era questo il caso della Dalmazia.

10.3. *La riscoperta europea dell'ottica*

L'ottica fu tra le prime teorie scientifiche ellenistiche recuperate. I pittori rinascimentali erano ovviamente interessati all' *Ottica* di Euclide, utile per ricostruire la teoria della prospettiva. Ma non ci si limitò a ciò.

Avevamo accennato alla fine del §3.1 alla dispersione della luce, argomento sul quale ben poco credito viene di solito dato alla "scienza antica". Poiché è abbastanza diffusa l'opinione che la teoria della dispersione (la teoria, cioè, della dipendenza dell'indice di rifrazione dal colore della luce rifratta) nasca con Newton, diamo la parola su questo argomento a Newton stesso. Nella sua *Opticks*, all'inizio della spiegazione del fenomeno dell'arcobaleno, è scritto:

> Questo arcobaleno è formato dalla rifrazione della luce del sole attraverso le gocce di pioggia. Ciò fu compreso da alcuni degli Antichi e scoperto e spiegato più completamente dal famoso Antonius de Dominis, Arcivescovo di Spalato, nel suo libro *De radiis visus et lucis*, pubblicato dal suo amico Bartolo a Venezia nel 1611 e scritto oltre 20 anni prima. Poiché egli insegna che [...] La stessa spiegazione è stata data da Descartes nelle sue *Meteore*.[45]

Segue l'esposizione di vari esperimenti effettuati dal de Dominis con sfere piene d'acqua.[46] Bisogna dedurne che la moderna teoria della dispersione non nasce, come spesso si crede, con Newton o con Descartes, ma con de Dominis.

Poiché il libro di de Dominis era stato scritto non dopo il 1590,[47] i suoi esperimenti di ottica dovevano essere iniziati alla stessa epoca, se non prima, dei primi esperimenti di Galileo (che risalgono al 1586). L'arcivescovo dalmata non è, quindi, solo l'iniziatore della moderna teoria della dispersione; deve trattarsi di uno dei fondatori del "metodo sperimentale" che, secondo i più, caratterizza la scienza moderna.

[45] I. Newton, *Opticks* (New York 1959), p. 169.
[46] I. Newton, *op. cit.*, p. 176-177.
[47] Cfr. *De radiis visus et lucis... Marci Antonii de Dominis*, Venezia 1611; prefazione dell'editore Giovanni Bartolo.

Notiamo però che l'opera di de Dominis sin dal titolo usa la terminologia ellenistica: vi si parla infatti ancora dei *raggi visuali* eliminati dagli Arabi, come abbiamo visto, nell' XI secolo, a opera di Ibn al-Haytham (Alhazen).[48] Inoltre la spiegazione di de Dominis del fenomeno dell'arcobaleno era già stata data, intorno al 1300, sia da Teodorico di Freiburg che, indipendentemente, dagli scrittori arabi Qubt ad-din al-Shirazi e Kamal ad-din al Farisi, che avevano descritto anche gli stessi esperimenti con le stesse sfere piene d'acqua.[49]

Il libro di de Dominis (che all'epoca della sua stesura insegnava ottica e altro nello Studio di Padova, dove qualche anno dopo sarebbe arrivato Galileo) non contiene solo la teoria dell'arcobaleno, ma anche quella delle lenti e (finalmente!) una spiegazione del funzionamento del cannocchiale, anche se sembra che all'epoca (intorno al 1590) non ne esistessero ancora. È vero che il libro fu pubblicato solo nel 1611, quando lo strumento era divenuto d'attualità grazie all'uso fattone da Galileo l'anno precedente, e si potrebbe mettere in dubbio la data della stesura affermata dall'editore, ma che intorno al 1590 si stesse diffondendo in Europa la teoria (anche se non ancora la pratica) del cannocchiale è mostrato dai precisi accenni a questo argomento contenuti nella seconda edizione della *Magia naturalis* di G.B. Della Porta (del 1589).[50]

I libri considerati più interessanti sono i più esposti al rischio di sparire dalle biblioteche. Potrebbe quindi non essere casuale se i manoscritti dell' *Ottica* di Tolomeo (che non era stata mai stampata) si perdono proprio nell'epoca in cui vi è un tale rinnovato fervore di studi sui fenomeni di rifrazione (cui era dedicata tanta parte dell'opera dello scienziato alessandrino). L'*Ottica* di Tolomeo viene infatti citata per l'ultima volta (da A. Rhode, che sembra conoscerne ancora tutti e cinque i libri) nel 1611 e successivamente viene considerata perduta.[51] Se ne

[48] Cfr. sopra, pp. 287-288.

[49] Cfr., ad esempio, [Crombie], pp. 93-97. Crombie è convinto che Teodorico di Freiburg avesse effettivamente compiuto gli esperimenti che Newton pensava avesse compiuto de Dominis (e che oggi vengono in genere attribuiti a Newton) e ne parla come di un "esempio insigne dell'uso del metodo sperimentale nel Medio Evo" (p. 93). Quanto alla coincidenza tra la spiegazione offerta da Teodorico di Freiburg e quella degli autori arabi citati, Crombie, pur giudicandola *strana*, la spiega con l'uso delle stesse fonti (p. 97). La non originalità del trattato ottico di de Dominis è stata sostenuta in [Ziggelaar].

[50] Abbiamo già incontrato Della Porta a proposito del recupero della macchina a vapore descritta da Erone e lo incontreremo di nuovo a proposito del termoscopio di Filone di Bisanzio; molte altre idee della tecnologia "moderna", come quella della cosiddetta "lanterna magica" (sulla quale aveva scritto anche Alhazen), appaiono per la prima volta in Europa nelle opere di questo autore di teatro e studioso di classici.

[51] Cfr. G. Govi, *Introduzione*, in [Govi: Tolomeo].

ritroverà, è vero, dopo due secoli, una versione latina da un testo arabo, ma, come abbiamo già notato nel §3.1, si tratta di un testo monco, che si interrompe proprio sul più bello.

È certo, comunque, che lo studio moderno dei fenomeni di rifrazione non si limitò all'attento esame dell' *Ottica* di Tolomeo. Mentre Tolomeo aveva creduto che la dipendenza dell'angolo di rifrazione dall'angolo di incidenza fosse esprimibile con un polinomio di secondo grado, gli studiosi moderni trovarono infatti la famosa "legge dei seni", esposta da Descartes nella sua *Dioptrique*.

La storia della legge della rifrazione ricorda però un po' quella della spiegazione dell'arcobaleno. Anche in questo caso Descartes era stato preceduto non solo da un autore moderno (da Snell, famoso soprattutto per i suoi studi di geometria sferica, come nell'altro caso da de Dominis) ma anche, secoli prima, da autori arabi. La "legge della rifrazione di Snell-Descartes", infatti, era sì rimasta ignota a Ibn al-Haytham, ma era stata ben nota, qualche decennio prima, a Ibn Sahl.[52] La circostanza che le conoscenze arabe sulla rifrazione tendano ad aumentare non con il trascorrere ma con il regredire del tempo fa sospettare che si tratti di risultati basati non su esperimenti originali, ma sullo studio di antiche fonti. Va anche notato che l'enunciato usato da Ibn Sahl riguarda un rapporto tra segmenti (non si nomina cioè esplicitamente la funzione dell'angolo che sarà chiamata *seno*) e che Ibn Sahl usa la legge come una conoscenza ben nota, senza giustificarla, né rivendicarne la scoperta.

10.4. *Un lontano discepolo di Archimede*

Alla fine del XVI secolo lo studio delle opere ritrovate della scienza esatta ellenistica si intensificò. Particolarmente importante fu lo studio di Galileo, che, dopo aver scritto diversi commenti ai trattati di Archimede, fu il primo, con i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, a tentare di costruire nuove "teorie scientifiche".

Poiché la lettura di Galileo non è molto diffusa e spesso lo si presenta come il fondatore di un metodo nuovo, quasi senza precedenti storici, va sottolineato che in Galileo l'obiettivo di recuperare la scienza ellenistica è del tutto chiaro ed esplicito.[53] Probabilmente l'amore e l'entusiasmo per questo lontanissimo

[52] L'enunciato della legge "di Snell-Descartes" è nel *Libro sugli strumenti ustori* che abbiamo già citato a p. 288 (n. 8).

[53] La migliore opera su Galileo è [Drake Galileo]. Mentre gli storici precedenti avevano tentato di ricostruire l'origine della scienza galileiana analizzan-

passato gli era stato trasmesso dal padre Vincenzo, che aveva coraggiosamente tentato di iniziare un analogo difficilissimo lavoro di ricostruzione in campo musicale.[54]

Alla fine della terza giornata dei *Discorsi* (giornata che contiene il suo massimo contributo alla scienza della dinamica) Galileo si complimenta con se stesso facendosi lodare da uno dei partecipanti al dialogo: Sagredo. Si tratta di un brano particolarmente significativo, essendo un'esposizione di quello che Galileo, ormai vecchio, pensa sia stato il suo massimo merito scientifico.

> Parmi veramente che conceder si possa al nostro Accademico, che egli senza iattanza abbia nel principio di questo suo trattato potuto attribuirsi di arrecarci una nuova scienza intorno a un suggetto antichissimo. Ed il vedere con quanta facilità e chiarezza da un solo semplicissimo principio ei deduca le dimostrazioni di tante proposizioni, mi fa non poco maravigliare come tal materia sia passata intatta da Archimede, Apollonio, Euclide e tanti altri matematici e filosofi illustri, e massime che del moto si trovano scritti volumi grandi e molti.[55]

L'ambiziosissimo obiettivo scientifico di Galileo era stato quindi il recupero, dopo tanti secoli di abbandono, del metodo scientifico ellenistico, consistente nell'elaborazione di sistemi assiomatico-deduttivi in cui inquadrare i fenomeni naturali. Lo spirito critico di Galileo gli fa individuare con chiarezza i propri modelli nei grandi scienziati del periodo aureo, senza che la sua evidente ammirazione sconfini in reverenza per una "antichità" indifferenziata. Galileo non esita infatti a dissentire sia da Aristotele che da Tolomeo.

Galileo riuscì in effetti a riprendere dai suoi lontani maestri sia l'idea del metodo sperimentale che quella del metodo dimostrativo. Manca però ancora in lui la capacità di usare i più raffinati strumenti matematici ellenistici. Egli infatti, mentre è in grado di usare le tecniche dimostrative euclidee e l'algebra geometrica, non riesce a comprendere del tutto (come del resto non riuscirà nessun altro dopo di lui ancora per più di due secoli) il cosiddetto "metodo di esaustione" e la teoria delle proporzioni.

La difficoltà della definizione euclidea di proporzione nasce

done i precedenti medievali, Stillman Drake ha chiarito come lo sviluppo delle idee non sia stato continuo, ma le stesse fonti greche siano state essenziali sia per gli Arabi che per Galileo; su questo punto cfr., in particolare, [Drake HGG].

[54] Vincenzo Galilei (compositore e teorico della musica) scrisse tra l'altro un *Dialogo della musica antica e della moderna* e pubblicò gli inni di Mesomede, del II secolo d.C. Il modello offerto dall'interpretazione della musica antica così riscoperta fu essenziale per la nascita dell'opera fiorentina.

[55] [Galileo Discorsi], pp. 266-267.

dal fatto che essa equivale a una costruzione del concetto di "rapporto tra grandezze"[56]; essa non può quindi essere capita da chi ha una concezione platonica della matematica e delle definizioni.[57] Se i "rapporti di grandezze" sono concepiti come oggetti realmente esistenti, la loro eguaglianza non può infatti che essere vista come una nozione ovvia; la complessa definizione di Euclide appare allora astrusa e, soprattutto, inutile. Galileo pensò di sostituire la definizione euclidea di proporzione con la "definizione" seguente, da lui giudicata più semplice:

> soggiugnerò anco in qual altro modo s'intendano quattro grandezze esser fra loro proporzionali; ed è questo. Quando la prima per avere alla seconda la medesima proporzione che la terza alla quarta non è punto né maggiore né minore di quello che ella dovrebbe essere, allora s'intende aver la prima alla seconda la medesima proporzione che à la terza alla quarta.[58]

Evidentemente all'epoca di Galileo si era ancora lontani dal riacquistare la capacità di costruire vere "teorie scientifiche".

A proposito del fondamentale recupero del metodo sperimentale, spesso si finisce col disconoscere il duro e consapevole lavoro di Galileo negando che vi fosse alcunché da imparare, in questa direzione, dall'antica scienza. Le cose divengono probabilmente più chiare ricordando brevemente le principali tappe dei lavori sperimentali di Galileo.

I primi esperimenti di Galileo di cui abbiamo notizia, del 1586, consistettero nel tentativo di ricostruire la base sperimentale dell'opera di Archimede *Sui galleggianti*. Essi si conclusero con la costruzione di una stadera idrostatica, descritta nell'opera *La bilancetta*. Galileo aveva capito sin da allora quanto fosse essenziale non limitarsi a studiare i testi dell'antica scienza, ma ricostruirne anche l'aspetto concreto.

Il secondo lavoro scientifico sperimentale di cui sappiamo è il primo sul moto dei gravi, descritto nel *De motu*. Poiché la teoria che Galileo ne trae non differisce da quella che Simplicio attribuisce a Ipparco,[59] non vi sono evidentemente motivi per pensare che Ipparco si fosse fondato su una base sperimentale meno solida.

[56] Cfr. sopra, p. 63 (dove è riportata anche la definizione) e p. 73.

[57] Cfr. sopra, p. 235.

[58] [Galileo Discorsi], p. 353; si tratta di un brano della quinta giornata, cioè della *Giornata aggiunta sopra le definizioni delle proporzioni d'Euclide*.

[59] Come osservato già in [Koyré SG], pp. 65-66, 97. Galileo nel *De motu* (p. 321) cita il passo di Simplicio sulla teoria di Ipparco che abbiamo già ricordato (cfr. sopra, pp. 255-256), ma sostiene di averlo letto solo dopo aver formulato indipendentemente la stessa teoria.

Quanto al fondamentale risultato che il tempo di caduta di un grave, se si trascura la resistenza dell'aria, non dipende dal suo peso, per secoli si è creduto che Galileo vi fosse arrivato lasciando cadere dei gravi dalla torre di Pisa. Il modo più semplice per giungere a tale risultato era certamente quello di leggerlo nel commento di Giovanni Filopono alla *Physica* di Aristotele.[60] Non è però facile sostenere la tesi che il metodo sperimentale, rimasto estraneo agli scienziati ellenistici, sia una novità introdotta nel VI secolo d.C. da un teologo commentatore di Aristotele. Poiché alcune affermazioni di Filopono sul moto dei gravi ricordano quelle che Simplicio attribuisce a Ipparco e i due commentatori avevano probabilmente accesso alle stesse fonti,[61] si può congetturare che anche l'indipendenza del tempo di caduta dal peso del grave fosse uno dei risultati esposti nell'opera di Ipparco sulla gravità.[62] Anche perché, essendo Ipparco l'ultimo scienziato ellenistico che, a nostra conoscenza, si sia occupato del moto dei gravi, se il risultato riferito da Filopono gli fosse stato ignoto, sarebbe difficile spiegare come mai esso fosse ben noto a Lucrezio.[63]

Una delle caratteristiche fondamentali del metodo galileiano è di solito individuata nel modificare opportunamente i fenomeni prima di sottoporli a misurazioni. Nel caso del moto dei gravi, cui si riferiscono i più importanti esperimenti di Galileo, la modifica essenziale consiste nel considerare gravi su un piano inclinato invece che in caduta libera.

Le prime considerazioni di Galileo sui piani inclinati sono anch'esse già nel suo lavoro giovanile *De motu*. Il brano più interessante riguarda il caso particolare del piano orizzontale. Galileo scrive che, in assenza di attrito,

[60] Giovanni Filopono, *In Aristot. phys.* ([CAG], vol. XVII), 683.

[61] Sui rapporti tra Simplicio e Giovanni Filopono cfr. sopra, pp. 285-286.

[62] La vera difficoltà da superare per giungere all'indipendenza del tempo di caduta dal peso è quella di riuscire a prescindere dalla resistenza dell'aria. Il risultato è quindi alla portata di qualsiasi teoria basata sul principio di inerzia e il concetto di attrito. Le considerazioni svolte nel §9.3 rendono plausibile che si trattasse di un risultato noto a Ipparco. Filopono (*op. cit.*, p. 642) parla anche di una δύναμις κινητική *incorporea* (aggettivo che, come abbiamo visto in Sesto Empirico, dall'epoca imperiale venne usato per gli enti delle teorie scientifiche ellenistiche) che sarebbe impressa a un proiettile al momento del lancio. Filopono, per indicare lo stesso concetto, usa anche un altro termine, destinato a un grande avvenire: ἐνέργεια κινητική.

[63] Lucrezio, *De rerum natura*, II, 225-239. A Clagett tuttavia "pare di poter desumere" dal brano di Filopono che egli avesse realizzato l'esperimento che era stato attribuito a Galileo ([Clagett], p. 582). Volendo attribuire l'esperimento alla più antica fonte disponibile che ne menziona il risultato, dovremmo attribuirlo a Lucrezio.

qualsiasi mobile, su un piano equidistante dall'orizzonte, sarà mosso da una forza minima, anzi anche da una forza più piccola di qualsivoglia altra forza.[64]

Questa frase (anche se Galileo non ne trae all'epoca tutte le conseguenze) segna il passo decisivo verso il superamento della fisica aristotelica e la formulazione del principio di inerzia. Ricordiamo che Erone aveva introdotto l'argomento scrivendo:

Dimostreremo che i pesi che hanno una tale posizione [cioè su un piano orizzontale privo di attrito] possono essere mossi da una forza minore di qualsiasi forza data.[65]

La dimostrazione di Erone, ottenuta considerando il piano orizzontale come caso limite di un piano inclinato con inclinazione tendente a zero, sarà riproposta da Galileo nei *Discorsi*.

Al periodo padovano risale il primo interesse di Galileo per gli esperimenti di idraulica; al 1593-94 risale in particolare il lavoro che portò Galileo a brevettare una macchina per il sollevamento dell'acqua.[66]

Tra gli esperimenti che più interessano Galileo negli anni successivi vi sono quelli relativi al principio del sifone e al funzionamento delle pompe aspiranti. All'epoca non si era però ancora in grado di costruire cilindri metallici con la precisione necessaria e si cercava di realizzare le pompe di Ctesibio in legno.[67] In queste condizioni si può facilmente immaginare che

[64] "Quae omnia si ita disposita fuerint [cioè in assenza di attrito], quodcumque mobile super planum horizonti aequidistans a minima vi movebitur, imo et a vi minori quam quaevis alia vis" (*Ed. naz. delle Opere di Galileo Galilei*, vol. 1, p. 299).

[65] Erone, *Meccanica*, I, iv, 20. Oggi abbiamo solo un manoscritto arabo dell'opera di Erone, ma Carra de Vaux, nell'introduzione alla sua edizione dell'opera ([Carra de Vaux: Erone, Mecc.]), riferisce di avere trovato riferimenti a manoscritti greci della *Meccanica* in varie biblioteche europee, in particolare in più biblioteche romane, nella Biblioteca Marciana di Venezia e all'Escurial e di non essere riuscito a rintracciarne nessuno. La segnalazione a Venezia risultò dipendere da un errore (un manoscritto della *Pneumatica* classificato con il titolo di *Meccanica*), ma degli altri manoscritti sembra che si fossero perse le tracce. Carra de Vaux sottolinea la difficoltà di ricostruire le strade prese dai manoscritti "soprattutto quando si tratta di biblioteche romane".

[66] *Ed. naz. delle Opere di Galileo Galilei*, vol. 19, pp. 128-129. A p. 209 è illustrato il funzionamento della coclea.

[67] Cfr., ad esempio, [Usher], pp. 338-339, dove l'impiego di cilindri metallici (di ghisa) per le pompe aspiranti è fatto risalire alla seconda metà del XVII secolo. Precedentemente, pur usandosi metalli per altri componenti delle pompe, i cilindri erano realizzati in legno. Evidentemente le tecniche di tornitura e molatura (necessarie per realizzare superfici metalliche con la precisione che assicuri l'aderenza tra cilindro e pistone) recuperarono il livello ellenistico (quando i cilindri delle pompe erano rivestiti di piombo) solo nella seconda metà del XVII secolo.

gli esperimenti sui quali si esercitava la riflessione di Galileo fossero soprattutto quelli ellenistici, descritti nelle antiche opere. Non stupisce quindi che anche le conclusioni teoriche avessero spesso la stessa origine. La spiegazione, per esempio, del principio del sifone data da Galileo nella prima giornata dei *Discorsi*, basata sulla coesione delle particelle d'acqua,[68] ripropone quella della *Pneumatica* di Filone di Bisanzio.[69]

Per quanto riguarda la catottrica, i fatti sperimentali che interessano di più Galileo e i suoi allievi sono quelli relativi agli antichi specchi ustori: nella prima giornata dei *Discorsi* Sagredo afferma di aver visto liquefare del piombo con uno specchio sferico e ne deduce l'enorme potenza di quelli di Archimede (che sa essere stati parabolici).[70] Pochi anni prima dei *Discorsi* era stato pubblicato il fondamentale trattato *Specchio ustorio* di Bonaventura Cavalieri in cui, oltre a studiare gli specchi parabolici recuperando le antiche conoscenze sulla proprietà focale della parabola e a esporre varie altre applicazioni della teoria classica delle coniche, si dimostrava anche che le traiettorie dei gravi sono parabole.

Sorvolando sui fondamentali lavori di astronomia osservativa, giacché, come sappiamo, molti non li includono nella "scienza sperimentale", Galileo si dedicò negli anni successivi a varie altre tematiche sperimentali ellenistiche, riguardanti tra l'altro la statica, l'aerostatica e la termologia. Particolarmente interessanti furono gli studi sull'espansione dei gas riscaldati (argomento di cui si interessarono a quei tempi, tra gli altri, anche Della Porta e Van Helmont[71]); questi studi portarono alla ricostruzione di alcuni esperimenti e apparecchi descritti da Filone ed Erone, aprendo la strada alla realizzazione dei moderni termometri.[72]

[68] [Galileo Discorsi], pp. 64-65.

[69] Filone di Bisanzio, *Pneumatica*, iii ([Prager: Filone], 129-130); poiché l'argomento della coesione non è riportato nella *Pneumatica* di Erone, la spiegazione "moderna" (basata sulla pressione atmosferica) era nota già a Empedocle (cfr. sopra, p. 97) e, d'altra parte, l'opera di Filone ci è pervenuta solo in testi latini e arabi molto corrotti, si può sospettare che Galileo sia stato tratto in inganno dalla corruzione del testo di Filone. La spiegazione fatta propria da Galileo è più chiara nel testo latino (in [Prager: Filone], p. 81), che sembra quello più lontano dall'originale.

[70] [Galileo Discorsi], p. 86.

[71] Il termine *gas* è una deformazione fiamminga del greco χάος e fu introdotto appunto da J. B. Van Helmont, cui evidentemente era nota la natura "caotica" dei gas: un'antica conoscenza (cfr. sopra, p. 38, n. 32 e p. 99, n. 82) che per secoli rimase apparentemente congelata nel nome. Debbo questa osservazione a F. Bonelli.

[72] Il *termoscopio* di Galileo (cioè, essenzialmente, un termometro a gas) è descritto in Filone di Bisanzio, *Pneumatica*, vii.

Vediamo ora come Galileo, a proposito del suo esperimento più famoso, quello sul moto dei gravi lungo un piano inclinato, ne descrive il punto essenziale, consistente nella misura del tempo di discesa:

> Quanto poi alla misura del tempo, si teneva una gran secchia piena d'acqua, attaccata in alto, la quale per un sottil cannellino, saldatogli nel fondo, versava un sottil filo d'acqua, che s'andava ricevendo con un piccol bicchiero per tutto il tempo che la palla scendeva nel canale e nelle sue parti: le particelle poi dell'acqua, in tal guisa raccolte, s'andavano di volta in volta con esattissima bilancia pesando, dandoci le differenze e proporzioni de i pesi loro le differenze e proporzioni de i tempi; e questo con tal giustezza, che, come ho detto, tali operazioni, molte e molte volte replicate, già mai non differivano d'un notabil momento. [73]

Galileo aveva ben capito quanto fosse essenziale, per riacquistare la base sperimentale dell'antica scienza, sostituire in qualche modo i precisi orologi ad acqua di cui da tempo si era perduta la tecnologia. Il fatto che le misure, pur tante volte ripetute, non differissero mai tra loro non può però non insospettire un fisico moderno. La descrizione del rudimentale apparato sperimentale (tanto inferiore agli orologi di Ctesibio) accresce il sospetto che le misure di tempo effettuate con secchia e bicchiere fossero in realtà integrate da altri sistemi. Prima di iniziare la descrizione esplicita dell'esperimento, Galileo aveva scritto una frase che fornisce la chiave di questo "metodo integrativo":

> replicando il medesimo atto molte volte per assicurarsi bene della quantità del tempo, nel quale non si trovava mai differenza né anco della decima parte d'una battuta di polso. [74]

Il polso era stato evidentemente l'orologio più usato. Questa circostanza fa riflettere su quanto si fosse ancora lontani, nonostante gli sforzi di Galileo, dalla raffinata tecnologia degli strumenti di misura (base di ogni vero metodo sperimentale) che aveva un tempo permesso a Erofilo sia il suo lavoro scientifico sperimentale sulle pulsazioni sia l'uso a fini diagnostici della teoria ottenuta. [75]

[73] [Galileo Discorsi], p. 213.
[74] [Galileo Discorsi], p. 213.
[75] Cfr. sopra, pp. 156-157, 165. L'osservazione può sembrare smentita dalla testimonianza di una lettera di Vincenzo Viviani a Leopoldo de' Medici (pubblicata nell'*Ed. Naz. delle Opere di G. Galilei*, XIX, pp. 647-659), secondo la quale Galileo ebbe l'idea di usare un pendolo per misurare la frequenza del battito. Naturalmente un pendolo permette solo di misurare tempi molto

Nonostante i limiti matematici e tecnologici, il recupero effettuato da Galileo fu straordinario, soprattutto sul piano metodologico. Galileo riprende dall'antica scienza l'umiltà del metodo scientifico, consistente nell'affrontare problemi ben circoscritti, come il moto dei gravi o l'idrostatica, con l'uso combinato di matematica ed esperimenti, senza cedere alla tentazione di ricorrere ai metodi della filosofia naturale per inseguire spiegazioni "globali" del comportamento della natura. Da quasi due millenni non si vedevano scienziati di questo genere.

Un altro punto che va sottolineato è che la frattura tra matematica e fisica, la cui inesistenza è in genere vista come un limite della scienza ellenistica, non si era verificata ancora nel lavoro di Galileo, che, usando allo stesso tempo matematica ed esperimenti, segue esattamente gli insegnamenti dei suoi lontani maestri.[76] Una *fisica* distinta dalla matematica nascerà solo con Newton.

10.5. *Due scienziati moderni: Keplero e Descartes*

Il lucido razionalismo di Galileo è un'eccezione tra gli atteggiamenti metodologici dei primi scienziati moderni. Keplero, il cui ruolo nella costruzione della scienza moderna è stato di primissimo piano, ha un atteggiamento ben diverso. Egli mescola con spirito eclettico conoscenze di varia origine: scienza ellenistica, filosofia aristotelica e neoplatonica, alchimia, astrologia e numerologia neopitagorica vengono amalgamate in una miscela nella quale l'elemento agglutinante è fornito dalla teologia. Il suo metodo scientifico può essere illustrato riportando qualche brano dei suoi scritti. A proposito delle maree, ad esempio, Keplero scrive:

> L'esperienza dimostra che tutto ciò che contiene umidità si gonfia quando la Luna cresce e si sgonfia quando la Luna decresce.[77]

maggiori del suo periodo e per questo motivo nelle esperienze sul moto dei gravi Galileo cercò di usare un rudimentale orologio ad acqua (oltre al proprio polso e ad altri sistemi) e non un pendolo. La frequenza del battito può essere dedotta dal tempo complessivo (misurabile con un pendolo) di un gran numero di battiti, ma in questo modo non può ottenersi il rapporto tra durata della sistole e durata della diastole (rapporto che sembra fosse noto a Erofilo e quindi era stato probabilmente da lui misurato).

[76] A questo proposito sono particolarmente interessanti le pagine di Galileo (nella II giornata dei *Discorsi e dimostrazioni*...) in cui si mostra come la forma di macchine e animali dipenda dalle dimensioni. Non conosco pagine altrettanto limpide e ricche di esempi nella letteratura ellenistica, anche se l'idea generale è chiaramente riferita da Vitruvio (*De architectura*, X, xvi, 5).

[77] J. Kepler, *De fundamentis astrologiae*, [Kepler OO], vol. I, p. 422.

Keplero ricava le distanze dei pianeti dalla loro corrispondenza con solidi platonici e metalli: egli crede nelle armonie musicali celesti e nella sfera di cristallo delle stelle fisse. Ecco come descrive la struttura dell'universo:

> La filosofia di Copernico assegna le parti principali del mondo a regioni distinte di questo. Poiché nella sfera, immagine di Dio creatore e archetipo del mondo (come è stato provato nel primo libro), ci sono tre regioni, simboli delle tre persone della Santissima Trinità: il centro, simbolo del Padre, la superficie, simbolo del Figlio, e l'intervallo, dello Spirito Santo, furono create altrettante parti principali del mondo, ognuna in una regione particolare della sfera: il Sole nel centro, la sfera delle fisse nella superficie, e infine il sistema dei pianeti nella regione intermedia. [78]

Egli determina poi i rapporti tra le masse delle tre zone:

> Poiché questi tre corpi sono analoghi al centro, alla superficie sferica e all'intervallo, simboli delle tre persone della Santissima Trinità, è credibile che ci sia tanta materia in uno quanta in ognuno degli altri due. [79]

Proseguendo nel ragionamento, Keplero giunge a determinare lo spessore della sfera cristallina delle stelle fisse in circa un dodicimillesimo del diametro del Sole, ossia, a suo parere, in poco più di due miglia germaniche.

L'eclettismo degli scienziati moderni ha avuto una funzione importante. Alcune antiche conoscenze, infatti, erano state alterate in modo tale da essere recuperabili solo da parte di spiriti eclettici. Questo punto può essere chiarito leggendo qualche altro passo di Keplero:

> La perfezione del mondo consiste nella luce, nel calore, nel moto e nell'armonia dei moti [...] Per quel che concerne la luce, Il Sole è la fonte della luce [...] Per ciò che concerne il calore, il Sole è il focolare del mondo; [...] Il Sole è un fuoco, come dissero i Pitagorici [...] E se non solo alle creature terrestri, ma anche a tutta l'aria eterea, per tutta l'estensione dell'universo, appartenesse qualche facoltà vegetativa, in tal caso bisognerebbe credere che essa fosse radicata nel Sole come nel cuore del mondo, e di là si diffondesse, col veicolo della luce, insieme col calore, in questa vastissima estensione dell'universo, nello stesso modo in cui negli animali la sede del calore e della facoltà vitale è nel cuore [...]
> Quanto al moto, il Sole è la causa prima del moto dei pianeti e il primo motore dell'universo [...] [80]

[78] J. Kepler, *Epitome astronomiae copernicanae*, [Kepler OO], vol. VI, p. 310.
[79] *Ibid.*, p. 334.
[80] *Ibid.*, pp. 310 sgg.

È dunque il Sole che fa muovere in cerchio i pianeti [...] e come può farlo se manca di mani per afferrare i pianeti? La funzione delle mani l'assolve la virtù del suo corpo, irradiata in linee rette per tutta l'estensione del mondo [...].[81]

Possiamo riconoscere alcune delle fonti di Keplero: l'ultima frase riecheggia passi che conosciamo di Vitruvio e di Plinio; il resto l'abbiamo letto, quasi negli stessi termini, in Teone di Smirne.[82] L'idea dell'interazione gravitazionale tra Sole e pianeti si è trasmessa dalla scienza antica a quella moderna anche grazie all'interesse di scienziati come Keplero per autori come Plinio e Teone di Smirne. Il razionalismo di Galileo lo aveva invece indotto a respingere l'idea della gravitazione, che trovava incorporata in tradizioni neopitagoriche ed ermetiche.

Naturalmente Keplero usava anche fonti molto più "scientifiche" di quelle riconoscibili nei brani precedenti, come Apollonio di Perga e Pappo. Tra i classici che lo interessarono particolarmente vi fu il dialogo di Plutarco *De facie quae in orbe lunae apparet*.[83] Ci si può chiedere se fonti antiche avessero aiutato Keplero nel lungo e arduo percorso che lo portò a determinare la forma ellittica delle orbite dei pianeti, così come l'avevano aiutato nel riconoscere il ruolo motore del Sole. Il metodo di Keplero che abbiamo visto all'opera nei brani precedenti, basato tra l'altro sulla perfezione della forma sferica, non sembra il più adatto per raggiungere tale risultato senza aiuto; anche perché i dati osservativi avrebbero potuto essere descritti altrettanto bene con un sistema di epicicli e, d'altra parte, almeno nel caso di Mercurio, l'orbita ellittica era disegnata già nelle *Tavole alfonsine*.

Per fare un altro esempio, l'importanza delle fonti nel determinare il metodo di Descartes può essere apprezzata confrontando la sua *Géométrie* con *Le Monde... ou Le traité de la Lumière*. Leggiamo, in questa seconda opera, il passo sul sasso fatto roteare con una fionda: un argomento di grande interesse, sul quale però, come sappiamo, si disponeva solo di scritti letterari di epoca imperiale:

Se, per esempio, un sasso si muove in una fionda secondo il cerchio AB, e lo considerate esattamente com'è nell'istante in cui arriva al punto A, trovate che esso sta muovendosi, [...] verso C [cioè lungo la tangente, come mostrato dalla figura], [...] mentre non potreste trovare nulla che ne renda il moto circolare. Tanto che, supponendo

[81] *Ibid.*, p. 344.
[82] Cfr. p. 267 per Vitruvio e Plinio e p. 283 per Teone di Smirne.
[83] Keplero ne pubblicò infatti una traduzione latina commentata (in [Kepler OO], vol. VIII).

che cominci allora a uscire dalla fionda, e che Dio continui a conservarlo com'è in quell'istante, certamente non lo conserverà con l'inclinazione a muoversi circolarmente, secondo la linea AB, ma con quella di andare in linea retta verso il punto C.

Dunque secondo questa regola bisogna dire che solo Dio è l'autore di tutti i movimenti che sono al mondo, in quanto sono e in quanto sono rettilinei; ma sono le diverse disposizioni della materia a renderli irregolari e a curvarli. Allo stesso modo i teologi c'insegnano che Dio è l'autore di tutte le nostre azioni, in quanto sono, e in quanto sono in qualche misura buone, ma sono le diverse disposizioni della nostra volontà che possono renderle viziose. [84]

Anche Cartesio, come Keplero, doveva essersi interessato al *De facie* ... e doveva averne studiato con cura il brano che abbiamo riportato a p. 252. Egli però, a proposito dei corpi "deviati", secondo Plutarco, da "qualcos'altro" aveva trovato naturale associare l' *altro* causa di deviazioni alle potenze del Male causa di tralignamenti. Cartesio usa un metodo che ci appare molto più "scientifico" quando, scrivendo di geometria, invece di Plutarco, può usare Pappo. [85]

Gli storici della matematica sottolineano sempre, però, la diversità tra la matematica di Cartesio e quella ellenistica. Boyer, con altri, individua la modernità del metodo di Cartesio nel suo abbandono del "principio di omogeneità", [86] che non aveva permesso ai matematici ellenistici il calcolo di espressioni quali x^2+x oppure x^2+x^3:

In un aspetto essenziale, però, egli [Cartesio] rompeva con la tradizione greca: infatti invece di considerare, per esempio, x^2 e x^3 come un'area e un volume rispettivamente, li interpretava anch'essi come segmenti. Ciò gli permetteva di abbandonare il principio di omogeneità, almeno esplicitamente. [87]

L'abbandono del principio di omogeneità non era stato in verità del tutto senza precedenti negli ambienti scientifici ellenistici. Neugebauer scrive:

Alla luce delle conoscenze recentemente acquisite in materia di testi babilonesi [...] il fatto, ad esempio, che Erone sommi aree e segmenti lineari non può più venir considerato un segno improvviso della rapida degenerazione del cosiddetto spirito greco, ma semplicemente riflette la tradizione algebrica mesopotamica. [88]

[84] [Descartes AT], vol. XI, pp. 45-47.
[85] La fonte principale della *Géométrie* è infatti la *Collezione* di Pappo.
[86] Cfr. p. 62, n. 36.
[87] [Boyer], p. 388.
[88] [Neugebauer, ESA], p. 177. I metodi di Erone e di Cartesio differiscono leggermente tra loro. Erone, dovendo effettuare la somma x^2+x, rappresenta i

Nonostante il luogo comune sulla matematica e le opinioni, il giudizio sulla modernità dei procedimenti matematici può evidentemente essere molto opinabile.

10.6. *Moti della Terra, maree e gravitazione*

Galileo, il cui principale obiettivo scientifico era stato la dimostrazione dei moti della Terra, aveva studiato certamente con grande cura le poche testimonianze sull'antico eliocentrismo e in particolare quelle di Plutarco (che, tra l'altro, è una fonte già citata da Copernico fin dalla prefazione del *De revolutionibus*). Un passo, in particolare, non poteva non avere attratto il suo interesse: quello, che abbiamo già riportato, nel quale Plutarco scrive:

> doveva pensare [Timeo] che la Terra fosse stata progettata non confinata e stabile ma rivolgentesi e ruotante, come successivamente affermarono Aristarco e Seleuco, il primo assumendolo solo per ipotesi e Seleuco invece provandolo?[89]

A Galileo dovette sembrare che per risolvere il problema che più gli stava a cuore non si dovesse far altro che completare il lavoro di Copernico, che aveva recuperato l'idea di Aristarco, ricostruendo anche la prova di Seleuco. Nel tentativo di ricostruire tale prova il punto di partenza non poteva non essere la ricerca di tutte le notizie disponibili in letteratura su Seleuco. Il primo frutto di una tale ricerca sarebbe stato certamente un passo di Aezio, all'epoca attribuito anch'esso a Plutarco, nel quale si accredita a Seleuco una teoria delle maree che coinvolge i moti della Terra.[90] L'importanza degli studi di Seleuco sulle maree era d'altra parte testimoniata, come sappiamo, anche da Strabone. La conclusione che la prova di Seleuco consistesse nel riconoscere nelle maree un effetto dei moti della Terra si imponeva spontaneamente. Non è quindi troppo strano che sia Galileo sia diversi altri studiosi prima di lui (tra i quali Celio Calca-

due addendi rispettivamente con un quadrato e con un segmento, che sono usati come raffigurazioni delle quantità algebriche, che nella tradizione mesopotamica sono gli enti matematici fondamentali. Cartesio, invece, per il quale le grandezze fondamentali restano quelle geometriche, può sommare solo dopo aver rappresentato entrambi gli addendi con segmenti. Mi sembra che il procedimento attualmente usato sia nella sostanza più vicino a quello di Erone.

[89] Plutarco, *Platonicae quaestiones*, 1006C.

[90] [DG], 383a, 17-25. Si tratta di un passo dell'opera *De placitis philosophorum*, tradizionalmente attribuita a Plutarco (e inclusa in particolare nell'edizione dei *Moralia* di Stephanus del 1572).

gnini, Andrea Cesalpino e Paolo Sarpi) si fossero sforzati di riconoscere nelle maree un effetto dei moti della Terra, nonostante nessuno di loro fosse riuscito a immaginare un plausibile rapporto di causa ed effetto.[91] Galileo, in particolare, nella giornata conclusiva del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* immagina (come Sarpi prima di lui) che le maree siano dovute alla non uniformità del moto terrestre,[92] ma non riesce a costruire in dettaglio delle argomentazioni ragionevoli; probabilmente fuorviato dal passo di Aezio, egli assegna un ruolo eccessivo alla rotazione terrestre[93] e, avendo rifiutato l'interazione gravitazionale con la Luna, non riesce a render conto del periodo mensile delle maree, che ben difficilmente poteva essere spiegato sulla base dei moti di rotazione e di rivoluzione.[94]

Galileo polemizza contro un'opera scritta da un *certo prelato*. Si tratta dello stesso de Dominis che abbiamo già incontrato nel §10.3, il quale attribuisce le maree all'interazione con la Luna e il Sole,[95] che tendono entrambi a rendere massimo il livello

[91] Cfr. [Sosio], dove sono riportati, in particolare, alcuni brani di un manoscritto di Sarpi del 1595 nei quali si anticipa l'analogia, poi ripresa da Galileo, tra le maree e il moto dell'acqua contenuta in un catino oscillante. Anche Andrea Cesalpino, che non era copernicano, aveva sostenuto (nella *Quaestio V* del III libro delle sue *Quaestiones peripateticae*, del 1571) che le maree fossero causate dal moto della Terra, senza riferirsi però né alla rotazione diurna né alla rivoluzione, ma a un moto della Terra introdotto *ad hoc*, che sarebbe comunicato alla Terra dal cielo. La strana posizione di Cesalpino sembra confermare che il collegamento tra maree e moti della Terra fosse suggerito non da argomenti scientifici ma da fonti classiche.

[92] È questo il tema principale dell'opera, cui Galileo aveva dato il titolo *Dialogo del flusso e reflusso del mare*. Il titolo fu poi cambiato in seguito a un intervento censorio dello stesso papa.

[93] Nel passo di Aezio, in un contesto riguardante la teoria delle maree di Seleuco, si dice qualcosa su una relazione tra la rotazione terrestre e il moto della Luna. Era stato probabilmente l'oscuro passo di Aezio a fuorviare anche Andrea Cesalpino. Per un'analisi dettagliata delle testimonianze su Seleuco e dell'influenza delle antiche fonti sulle teorie moderne delle maree si rimanda rispettivamente a [Russo 6] e a [Bonelli Russo].

[94] Anche altri studiosi, sulla base del passo di Aezio, sono giunti alla conclusione che la prova di Seleuco fosse basata in modo essenziale sulla rotazione diurna. Neugebauer, ad esempio, scrive: "In modern times Seleucus has become famous as supporting Aristarchus in the assumption of an axial rotation of the earth, relating it to his theory of the tides" ([Neugebauer, HAMA], p. 611). In realtà il passo di Aezio non è del tutto chiaro, ma vi si afferma certamente, in un contesto riguardante le maree, che la Luna "si oppone" al moto della Terra. L'affermazione riferita da Aezio continuò a interessare gli scienziati fino alla fine dell'Ottocento, epoca in cui era ancora normale per gli uomini di scienza leggere i classici greci, come si può desumere, ad esempio, dall'attento esame delle testimonianze su Seleuco compiuto dal fondatore della moderna teoria dell' *attrito di marea* (cfr. [Darwin G.] , p. 76).

[95] "Itaque dicimus luminaria illa duo Solem & Lunam habere vim magnam, quasi magneticam" (M. A. de Dominis: *Euripus, seu de fluxu et refluxu maris sententia...*, Roma, 1624, p. 5).

delle acque dove sono allo zenit e nel punto antipodale; de Dominis ne deduce che, poiché se il Sole o la Luna è allo zenit su un punto del Tropico del Cancro il punto antipodale è sul Tropico del Capricorno, le due alte maree giornaliere dovrebbero essere tra loro diverse[96]; egli fornisce, su questa base, la corretta spiegazione teorica delle differenze osservate da Seleuco.[97] De Dominis non espone, però, l'argomento precedente a sostegno della teoria accennata, ma (è questo il punto interessante!) per respingerla, essendo convinto che le due maree giornaliere siano sempre eguali. Il passo di de Dominis è quindi complementare a quello di Strabone citato a pag. 276, in quanto contiene una spiegazione teorica, in Strabone del tutto assente, della fenomenologia riferita da Strabone, ma ignorata da de Dominis.[98]

Abbiamo trovato un ulteriore significativo elemento a favore della tesi, già sostenuta nel §9.8, che anticamente fosse stata fornita una spiegazione teorica del ciclo delle diseguaglianze tra le due maree giornaliere. Infatti se è poco credibile che un riformatore religioso e giurista abbia elaborato autonomamente una corretta teoria matematica del ciclo annuale delle differenze tra le due maree giornaliere, è certamente ben più difficile ammettere che possa averlo fatto ignorando (come de Dominis mostra di ignorare) l'esistenza di tali differenze. Si tratta in realtà di un fenomeno osservabile solo in mari, come quello Arabico, le cui maree erano state studiate in epoca ellenistica, ma delle quali non si aveva più notizia nel XVII secolo.[99] È interessante notare che una teoria simile a quella di de Dominis (basata, cioè, sull'attrazione della Luna e del Sole e sul riconoscimento che il loro effetto è equivalente in due punti antipodali) era stata già esposta, all'inizio del Cinquecento, da un altro padovano di origine dalmata: Federico Crisogono di Zara.[100]

[96] M. A. de Dominis, *op. cit.*, pp. 5-7.

[97] Cfr. sopra, p. 277, n. 139.

[98] Naturalmene de Dominis (come chiunque altro ai suoi tempi avesse voluto occuparsi di maree o di altri argomenti di geografia fisica) non poteva ignorare l'opera di Strabone. Subito dopo aver riportato le osservazioni di Seleuco, Strabone aveva però aggiunto che Posidonio aveva inutilmente tentato di osservare a Cadice il fenomeno descritto da Seleuco per il *Mare Eritreo*. De Dominis ne aveva probabilmente dedotto non che le maree dei due mari avessero un diverso andamento, ma che non bisognasse prestar fede a Seleuco.

[99] Secondo l'autorevole testimonianza di G. H. Darwin, in Europa non se ne aveva notizia neppure all'inizio del XIX secolo. Darwin osserva infatti che le testimonianze sulla teoria di Seleuco non avevano potuto essere comprese, all'inizio dell'Ottocento, dal filologo che le aveva pubblicate per la scarsa conoscenza che all'epoca si aveva delle maree in regioni così remote ([Darwin G.], p. 76).

[100] Lo scritto di Crisogono (*Tractatus de occulta causa fluxus et refluxus maris*) è incluso nella raccolta delle sue opere (*Federici Chrisogoni... de modo collegiandi et pronosticandi et curandi febris...*, Venezia, 1528). Diverse affer-

Dopo essere stato vescovo di Segna e arcivescovo di Spalato, de Dominis si convertì all'anglicanesimo e si trasferì in Inghilterra. Riconvertitosi al cattolicesimo, tornò a Roma, dove finì i suoi giorni rinchiuso in Castel S. Angelo, mentre era in corso un processo a suo carico. Il suo corpo fu bruciato pubblicamente in Campo de' Fiori insieme ai suoi libri in esecuzione di una condanna *post mortem* al rogo e alla *damnatio memoriae.*[101] Il ricordo dei suoi scritti fu probabilmente conservato meglio in Inghilterra.

10.7. *La filosofia naturale di Newton*

Un esame del rapporto tra scienza ellenistica e scienza moderna non può prescindere dall'opera di Newton, che della scienza moderna è stato spesso considerato il principale fondatore. Cominciamo con il ricordare come Newton, nei *Principia*, esamina il concetto di spazio:

> Tutte le cose sono collocate [...] nello spazio quanto all'ordine della posizione. È nella loro essenza essere luoghi: ma è assurdo che i luoghi primari siano mossi. Questi sono dunque i luoghi assoluti, e i soli moti assoluti sono le traslazioni da questi luoghi.
> È vero però che, poiché queste parti dello spazio non possono essere viste o distinte fra loro mediante i nostri sensi, usiamo in loro vece le loro misure sensibili [...] Così invece dei luoghi e dei moti assoluti usiamo i relativi; né ciò riesce scomodo nelle cose umane: ma nella filosofia occorre astrarre dai sensi. Potrebbe anche darsi che non vi sia alcun corpo in quiete al quale possano venire riferiti i luoghi e i moti.[102]

Le idee di Newton, anche se apparentemente vicine a quelle di Aristotele, da cui sembrano trarre origine, ne differiscono in

mazioni di de Dominis ricordano passi analoghi dell'opera di Crisogono, ma l'assenza, in quest'ultima, di riferimenti al ciclo delle diseguaglianze diurne fa escludere una dipendenza essenziale di de Dominis dal suo più antico conterraneo e fa supporre piuttosto che le analogie siano dovute a una fonte comune.

[101] Sembra che gli storici della scienza, anche se non cattolici, si siano in genere attenuti alla sentenza dell'Inquisizione. Non esistono infatti studi sui lavori scientifici di de Dominis (a parte l'articolo citato di Ziggelaar sul trattato di ottica e qualche accenno alla teoria dell'arcobaleno, reso inevitabile dalla citazione di Newton). Per il pensiero politico-religioso dell'arcivescovo (che fu tra le principali fonti del successivo giurisdizionalismo) e la sua vicenda biografica, oltre ai lavori del secolo scorso (in serbo-croato) di Ljubic, cfr. [Russo A.] e [Malcolm].

[102] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, Definizioni, scolio.

un aspetto essenziale. Lo spazio assoluto di Aristotele non era altro, infatti, che quello familiare dell'esperienza quotidiana, fisso con la Terra, e ciò lo metteva in immediata relazione con i dati empirici. Abbiamo già visto come si trattasse di una concezione sostanzialmente incompatibile con l'"ipotesi" di una Terra in moto.[103] Non a caso Tolomeo, che era tornato allo spazio aristotelico, aveva rifiutato i moti della Terra e Galileo, che aveva accettato l'eliocentrismo, aveva rifiutato lo spazio assoluto, arrivando al principio di relatività. In Newton la concezione aristotelica coesiste invece con il recupero di Aristarco (ormai impostosi irreversibilmente dopo i lavori di Keplero), cosicché lo spazio, pur essendo assoluto come quello di Aristotele, non corrisponde più ad alcun dato empirico. Ne segue che i moti di cui Newton si occupa nei suoi "assiomi" o "leggi del movimento" sono moti non percepibili. La 'filosofia naturale' di Newton ha per oggetto una natura che, a differenza di quella di Aristotele, trascende l'esperienza. Il primo passo per costruirla consiste nell'"astrarre dai sensi". Non si tratta, si badi bene, dell'astrazione necessaria per sostituire agli oggetti reali il loro modello teorico, ma della necessità di prescindere completamente dalle "misure sensibili", poiché non è possibile alcuna "regola di corrispondenza" tra i moti relativi e quelli assoluti che, essendo riferiti allo spazio immobile impercepibile, non hanno alcuna relazione con i fenomeni.[104] Newton è costretto pertanto, come del resto dice, a non occuparsi di "cose umane".

Se è questo il 'metodo sperimentale' che caratterizza la scienza moderna, è probabile che scienziati come Archimede, Ctesibio ed Erofilo effettivamente non ne avessero avuto la minima idea.

Sul suo concetto di spazio Newton costruisce poi, con piena coerenza metodologica, quelli di moto e di forza:

> I moti totali e assoluti non si possono definire che per mezzo di luoghi immobili; [...] ma non esistono luoghi immobili, tranne quelli che dall'infinito per l'infinito conservano, gli uni rispetto agli altri, la stessa posizione; e così rimangono sempre immobili, e costituiscono lo spazio immobile.
> Le cause, per le quali i moti veri sono distinti da quelli relativi e viceversa, sono le forze impresse sui corpi al fine di generare movi-

[103] Cfr. sopra, pp. 105-106.

[104] In seguito Newton identifica lo spazio assoluto con un sistema di riferimento solidale con il baricentro del sistema solare e le stelle fisse, ma questa identificazione è gratuita, non potendo avere alcuna relazione con i dati sperimentali. Tale identificazione, equivalente all'assunzione che il centro del mondo sia in quiete (Ipotesi I del III libro dei *Principia*), è giustificata da Newton con l'unico argomento che essa "è accordata da tutti".

mento. Il moto vero non può essere generato né modificato se non per effetto di forze impresse sullo stesso corpo in movimento: ma il moto relativo può essere generato e modificato senza forze impresse sul corpo.[105]

Le 'forze newtoniane' (che spesso sono state rivendicate come novità essenziale della scienza moderna) sono quindi le cause efficienti dei "moti assoluti", cioè dei cambiamenti dei "luoghi immobili", che a loro volta sono qualcosa di molto oscuro, la cui unica proprietà certa è quella di non avere nulla a che vedere con le "misure sensibili". Va notato che sembra che secondo Newton non possano esservi "moti veri" senza le forze che ne sono la causa. Newton non sembra quindi accettare in questo passo il principio d'inerzia.[106]

Nonostante l'impostazione appena descritta, Newton tenta, ecletticamente, di mutuare da Euclide un ordine espositivo assiomatico-deduttivo. I suoi *Principia*, infatti, come gli *Elementi*, contengono "definizioni" e "assiomi". Ricordiamo, però, le prime "definizioni":

Definizione 1. La quantità di materia è la misura della medesima ricavata dal prodotto della sua densità per il volume.
Definizione 2. La quantità di moto è la misura del medesimo ricavata dal prodotto della velocità per la quantità di materia.
Definizione 3. La "vis insita" della materia è la sua disposizione a resistere; per cui ciascun corpo, per quanto sta in esso, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.
Definizione 4. Una forza impressa è un'azione esercitata sul corpo al fine di mutare il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.
Definizione 5. La forza centripeta è la forza per effetto della quale i corpi sono attratti, o sono spinti, o comunque tendono verso un qualche punto come verso un centro.[107]

Quelle che negli sviluppi successivi sono divenute delle grandezze fisiche sono qui definite come disposizioni o azioni diret-

[105] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, Definizioni, scolio.

[106] Si può obiettare che le forze sono indicate come necessarie per "generare" il moto e non per conservarlo. D'altra parte se si ammette che Newton consideri possibili "moti veri" in assenza di forze non si capisce come l'esistenza di forze come "cause" possa permettere di distinguere i moti veri da quelli relativi. Mi sembra quindi che in questo passo coesistano la concezione aristotelica, su cui si fonda la possibilità di identificare i moti veri come quelli che sono effetti di forze, con quella opposta (della cui origine ci occuperemo tra poco) secondo la quale le forze sono necessarie solo per modificare i moti.

[107] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, Definizioni I-V.

te a particolari fini. Sembra che Newton non intenda costruire "teorie scientifiche" nel senso che abbiamo dato a questo termine, cioè nel senso di Euclide e di Archimede. L'intenzione, come nel brano precedente, parrebbe piuttosto quella di sviluppare una filosofia della natura basata su concetti aristotelici, come quelli di causa efficiente e di causa finale.

A questo punto occorre affrontare un problema a prima vista molto difficile. Come ha fatto la "meccanica newtoniana", che poggiava su queste basi, a divenire una vera "teoria scientifica"?

Innanzitutto va notato che il metodo dimostrativo, che era presente nella cultura europea soprattutto grazie agli *Elementi* di Euclide, costituiva un efficace antidoto all'uso nella scienza dei metodi della filosofia peripatetica e della teologia, anche al di là della stessa volontà degli scienziati. Trattata con dosi massicce di questo metodo, infatti, anche una "teoria" magmatica è costretta ad assumere, prima o poi, una forma deduttiva. Questa spiegazione non è però sufficiente. Infatti la dinamica newtoniana non solo riuscì a evolvere verso una teoria coerente al suo interno, ma fu subito utilizzabile come modello di moti reali: in particolare di quelli dei pianeti. Vi debbono essere quindi altri elementi.

Rileggiamo le definizioni con cui Newton inizia i *Principia*. La prima è priva di senso, giacché la densità non potrebbe essere definita che ottenendone una buffa tautologia. La seconda è inutilizzabile perché dipende dalla prima. La terza e la quarta sono invece molto interessanti poiché, anche se enunciate in un linguaggio non scientifico,[108] inseriscono nel quadro aristotelico un'idea ad esso estranea: quella di considerare "secondo natura" non solo la quiete, ma anche il moto rettilineo uniforme, chiamando "forze impresse" le cause efficienti delle deviazioni da tale moto. Si tratta di un'idea, come oggi sappiamo, foriera di grandi sviluppi. Bisogna però osservare che questa idea si sovrappone, senza sostituirla, a quella più genuinamente aristotelica, presente nel brano riportato prima, in cui le forze erano state individuate come le cause efficienti dei "moti veri". Le definizioni 3 e 4 hanno quindi delle caratteristiche anomale rispetto al resto della trattazione.

La definizione successiva è strana. Perché, subito dopo la definizione generalissima di forza, introdurre la "forza centripeta"? Se si tratta solo di un termine descrittivo, che sarà usato per

[108] È chiaro che si tratta di definizioni essenzialiste, di tipo aristotelico, che non possono individuare alcuna grandezza fisica misurabile (cfr. sopra, p. 235). Newton ne è forse in parte consapevole, poiché, a differenza delle definizioni precedenti, non definisce la *vis insita* e la *forza impressa* come misura di qualcosa.

le eventuali forze provviste di un centro, non si capisce perché parlarne tra le primissime definizioni, né perché attribuirne gli effetti apparentemente a tutti i corpi. Se invece si sta introducendo una "legge di natura" non si capisce bene di quale legge si tratti. Se, come può sembrare, si tratta della gravitazione, perché i corpi non si attraggono reciprocamente ma sono attratti tutti da un punto? Quali sono i punti che attirano i corpi? E di cosa sono mai il centro? Sembra tutto molto misterioso.

Plutarco, nel *De facie quae in orbe lunae apparet*, aveva scritto:

> La luna è impedita dal cadere [sulla terra] dal suo moto e dalla rapidità della sua rotazione, proprio come le pietre legate alle fionde sono trattenute dal cadere dal loro rapido moto circolare. *Poiché ogni corpo continua nel suo moto secondo natura, finché non ne è deviato da qualcos'altro.* [109]

Se l'interpretazione del brano di Plutarco che abbiamo dato nel §9.3 è corretta, Newton, nelle definizioni 3 e 4 dei *Principia*, era riuscito a restaurare il significato originale dell'affermazione riferita da Plutarco nella frase trascritta in corsivo. Dovendo dare un nome al "qualcos'altro" Newton (più felicemente di Cartesio) era ricorso alla terminologia aristotelica, parlando di *forze*. Poco più avanti Plutarco aveva scritto:

> [...] il centro. Poiché questo è [il punto] verso il quale tutti i corpi pesanti, da ogni parte, spingono tendendovi e sono trasportati e si inclinano. [110]

La definizione 5 dei *Principia* è praticamente la traduzione di questo passo. Sorge un dubbio: che siano influenzate da Plutarco le definizioni su cui è basata l'opera fondamentale della "scienza moderna"? Per capire se l'impressione di una dipendenza diretta di Newton da Plutarco è fondata, diamo la parola a Newton stesso che, subito dopo la definizione 5, la illustra nel modo seguente:

> Di questo genere è la gravità, per effetto della quale i corpi tendono verso il centro della terra; la forza magnetica, per effetto della quale il ferro va verso la calamita; e quella forza, qualunque essa sia, per effetto della quale i pianeti sono continuamente deviati dai moti rettilinei e sono costretti a ruotare. Una pietra, fatta ruotare da una fionda, tende ad allontanarsi dalla mano che si muove in cerchio. [111]

[109] Plutarco, *De facie...*, 923 C-D.
[110] Plutarco, *De facie...*, 923 E-F.
[111] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, Definizione V, commento.

L'esempio della calamita è descritto in modo incoerente con la definizione, giacché non si dice che calamita e ferro vanno verso un *centro* comune, ma, asimmetricamente, che il ferro va verso la calamita. Come mai? Evidentemente perché solo quest'ultima possiede la virtù di attirare e la definizione appena scritta non riesce a prevalere su questo argomento di stampo aristotelico. A parte questa aggiunta, la cui origine spuria è mostrata dalla sua incoerenza,[112] e la sostituzione della Luna con i pianeti (resa possibile dal recupero della teoria di Aristarco), per il resto attraverso le parole di Newton sembra di riconoscere ancora Plutarco.

La lettura del *De facie quae in orbe lunae apparet* aveva certamente avuto un ruolo nel guidare la formulazione dei *Principia*, poiché Newton aveva inserito lunghi brani del *De facie...* (tra i quali tutti quelli che abbiamo riportato) nella prima stesura, rimasta inedita, dei *Principia*.[113]

Essendosi perduti i trattati originali, Plutarco era divenuto prezioso. Anche Copernico aveva dovuto usare, tra gli altri, Plutarco per ricostruire Aristarco, così come gli inventori dell'età moderna dovranno ripartire dai "giochini" di Erone per ricostruire la tecnologia alessandrina e Freud da quella che crede una "credenza popolare... vicina alla verità", trasmessa da Artemidoro di Daldi, per muoversi nella direzione di Erofilo di Calcedonia.

Quando però la fonte non è Euclide o Archimede, ma un tardo poligrafo come Plutarco, la differenza si vede. Infatti l'ingrediente metafisico, che in larga misura manca, ad esempio, in Galileo, diviene essenziale. In questi casi, infatti, già la fonte, non avendo chiara la distinzione tra "teoria scientifica" e realtà da essa modellata, tende a inserire la trattazione nel quadro della filosofia naturale pre-ellenistica, in genere aristotelica, quadro che gli scienziati moderni sono abituati a contaminare con le Sacre Scritture (di cui Newton era un esegeta appassionato).

Plutarco non è l'unica fonte letteraria classica usata da Newton. Nel passo seguente la fonte, anche se non è citata esplicitamente, è evidentemente Seneca:

[112] Più in dettaglio: nel caso del grave attirato dalla Terra o del pianeta attirato dal Sole l'asimmetria della descrizione è giustificata dall'enorme sproporzione tra le masse dei due corpi considerati, sproporzione che evidentemente non sussiste nel caso della calamita, che pertanto offriva l'unica possibilità di applicare il concetto di centro introdotto nella definizione. L'asimmetria mantenuta in questo caso è quindi l'unica veramente incoerente e dimostra l'origine eterogenea della definizione e dell'esempio.

[113] I brani sono in alcuni scolii di Newton ai *Principia*, pubblicati per la prima volta da P. Casini in [Newton, *Scolii classici*]. Nella biblioteca personale

> Tali comete, da molti annoverate un tempo tra i corpi celesti, erano ritenute stelle erranti [cioè pianeti] dai Caldei, espertissimi in questioni astronomiche, come se discendendo con singole rivoluzioni alle parti più basse di orbite fortemente eccentriche, si mostrassero di quando in quando visibili alla nostra osservazione.[114]

Si riconosce chiaramente Seneca anche nel passo seguente, che è particolarmente significativo:

> Perciò la Terra, il Sole e tutti i pianeti del nostro sistema solare, secondo il pensiero degli antichi, sono fra loro reciprocamente gravi, e per la forza reciproca di gravità cadrebbero l'uno sull'altro e concorrerebbero in un'unica massa, se tale caduta non fosse impedita dai moti circolari.[115]

Il salto concettuale da un'astronomia puramente descrittiva alla "teoria della gravitazione" consiste (come ci hanno insegnato sin da bambini) nel riconoscere che le regolarità osservate nel moto del Sole, della Luna e dei pianeti (pur trattandosi di pochissimi corpi e pur non avendo alcuna speranza di osservarne mai altri) non dipendono dalla natura "celeste" di tali corpi, ma solo dal fatto che si tratta di "corpi pesanti" e possono essere generalizzate formulando una teoria che assegni analoghe regolarità a tutti i moti ipotizzabili, compreso quello di un sasso, di una mela o di un fiume che oscilli intorno al centro della Terra. I brani di autori classici che abbiamo discusso nel capitolo nono, alla luce dell'uso fattone, tra gli altri, da Keplero e da Newton, mostrano che questo passo è stato compiuto una sola volta nella storia: dalla scienza ellenistica.

Perché la moderna dinamica basata sulla teoria della gravitazione potesse formarsi come teoria scientifica, dando origine alla moderna "fisica", sono stati essenziali due gruppi di elementi.

Il primo gruppo era formato da alcuni strumenti tecnici e metodologici ellenistici, contenuti in particolare nelle opere di Euclide e di Archimede. Questi strumenti includevano:

di Newton era naturalmente presente l' *Opera omnia* di Plutarco (al N. 133 in [Harrison]). La lettura del *De facie...*, in particolare, doveva risalire agli anni della giovinezza, quando Newton, nel 1664, aveva iniziato la sua carriera scientifica occupandosi appunto dell'aspetto del disco lunare.

[114] I. Newton, *De mundi sytemate liber*, 1. Cfr. i passi di Seneca sulle comete riportati a p. 280.

[115] "Igitur Terra Sol et Planetae omnes qui in nostro systemate ex mente veterum graves sunt in se mutuo et vi gravitatis mutuae caderent in se invicem & in unam massam coirent nisi descensus ille a motibus circularibus impediretur" ([Newton, *Scolii classici*], p. 46). Newton (che aveva certo letto Seneca senza il timore, di tanti studiosi moderni, di commettere anacronismi attribuendogli concetti "newtoniani") dà un'autorevole conferma alle interpretazioni dei passi di Seneca avanzate nei §§ 9.6 e 9.9.

– Il metodo assiomatico-deduttivo, risalente agli *Elementi*, che forniva lo schema concettuale generale cui doveva adeguarsi qualsiasi teoria scientifica che avesse voluto usare i risultati della matematica classica (cui, d'altra parte, non era certo possibile rinunciare).

– Il cosiddetto "metodo di esaustione", alla cui relazione con l'embrione di analisi infinitesimale sviluppato da Newton accenneremo nel prossimo paragrafo.

– La meccanica di Archimede, esposta in particolare nel trattato *Sull'equilibrio delle figure piane*, in cui si spiegava come usare i metodi precedenti per fondare una "teoria scientifica" della meccanica.

Il secondo gruppo consisteva in un insieme di informazioni sulla dinamica e la gravitazione che, per la perdita dei trattati originali, erano disperse in varie opere, il più delle volte scritte da autori incompetenti e spesso inserite in tradizioni di pensiero lontane dalla scienza. La natura frammentaria ed eterogenea di queste testimonianze rende difficile la loro individuazione. Sulla base dell'esame di una piccola parte della letteratura ancora accessibile si può dire che esse includevano certamente:

– Le indicazioni sul principio d'inerzia, le forze centrifughe e la gravità (verso la Terra) trasmesse da Plutarco nel *De facie...* Queste indicazioni comprendevano un insieme di "esercizi di dinamica", descritti con le caratteristiche qualitative delle soluzioni.[116]

– Varie indicazioni complementari alle precedenti contenute, tra l'altro, nei commenti di Simplicio e di Giovanni Filopono alle opere di Aristotele, nella *Meccanica* di Erone e nei *Problemi meccanici* pseudo-aristotelici.

– Diverse fonti che riportavano l'idea dell'interazione gravitazionale dei pianeti con il Sole e dell'uso di quest'interazione in ambito eliocentrico per elaborare una "meccanica celeste" che potesse spiegare sia il moto dei pianeti che quello, lungo orbite più allungate, delle comete. Queste fonti comprendevano sia autori classici (come Seneca, Plinio e Vitruvio), sia, come vedremo, una tradizione di scritti che risaliva a opere neopitagoriche ed ermetiche della tarda antichità.

– Alcune testimonianze sull'antica teoria delle maree, basata sull'interazione gravitazionale, che non da tutti era stata dimenticata.[117]

[116] Sambursky (che fu soprattutto un fisico sperimentale), occupandosi del dialogo di Plutarco, osserva significativamente che "alcune [conclusioni di Plutarco]... richiamano alla mente esercizi classici presi dalla teoria della gravitazione di Newton" ([Sambursky], p. 218). Egli non si pone però il problema delle fonti del dialogo, ma considera l'opera un originale "saggio scientifico" di Plutarco, da lui considerato il "fondatore dell'astrofisica" (!).

[117] Come abbiamo visto nel §10.6, sull'argomento delle maree si erano sviluppate, tra Cinquecento e Seicento, due linee di pensiero in vivace polemica tra

Gli elementi dei due gruppi precedenti non erano però sufficienti, in quanto per matematizzare gli elementi del secondo gruppo non bastano gli strumenti matematici forniti dal primo. L'ulteriore (essenziale) elemento, che forniva lo strumento per inquadrare in un rigoroso schema matematico, metodologicamente omogeneo alle opere del primo gruppo, le indicazioni qualitative fornite dal secondo era la teoria delle sezioni coniche di Apollonio di Perga. Poiché le orbite dei corpi sottoposti a un campo gravitazionale centrale sono sezioni coniche, dal punto di vista matematico, infatti, la teoria della gravitazione può essere considerata un insieme di "esercizi di teoria delle coniche".[118]

Il recupero della teoria di Apollonio era stato in effetti uno dei principali obiettivi dei matematici del XVII secolo. Abbiamo già ricordato lo *Specchio ustorio* di Bonaventura Cavalieri (del 1632), nel quale i primi elementi della teoria erano stati applicati agli specchi ustori, ai fari, all'acustica e al moto dei gravi. Nel 1655 fu pubblicato il *Tractatus de sectionibus conicis* di J. Wallis. Sembra però che anche Wallis avesse potuto studiare solo i primi quattro libri del trattato di Apollonio, cioè quelli pervenutici in greco.[119] Una versione dei tre libri successivi dell'opera fu pubblicata per la prima volta a Firenze nel 1661, in una traduzione latina da un rifacimento arabo; l'edizione fu curata da Abraham Echellensis e Giovanni Alfonso Borelli (lo scienziato che fu incluso da Newton tra i propri predecessori a proposito della legge di gravitazione universale). Il recupero di Apollonio continuò anche dopo la pubblicazione dei *Principia* (del 1687). Un'edizione critica dei primi sette libri, contenente il testo greco dei primi quattro e una traduzione latina dei tre successivi, basata su diversi manoscritti arabi, fu infine pubblicata nel 1710.

loro, che attribuivano il fenomeno rispettivamente all'interazione con la Luna e il Sole e ai moti della Terra. La seconda linea non si esaurì con le infelici argomentazioni di Galileo, ma attraverso alcuni passi intermedi, dovuti a G.B. Baliani e a J. Wallis (un importante matematico che ebbe una profonda influenza su Newton), portò alla considerazione delle forze oggi dette "inerziali", dovute in particolare al moto della Terra attorno al baricentro del sistema Terra-Luna (cfr. [Wallis]). Le due linee, che, come abbiamo visto, sembrano essersi originate entrambe dall'analisi delle frammentarie testimonianze sugli studi di Seleuco, furono così pronte a incontrarsi di nuovo nella meccanica moderna. Maggiori particolari su questa storia esemplare sono in [Bonelli Russo].

[118] Ad esempio Newton risolve nei *Principia* il problema di trovare una conica passante per cinque punti dati; secondo Heath si tratta di un problema in sostanza già risolto da Apollonio, che forse non aveva incluso la dimostrazione nel suo trattato per non allungare troppo l'esposizione (cfr. [Heath: Apollonio], Introduction, cap. VI, p. cli).

[119] I primi quattro libri erano una sorta di manuale introduttivo; i risultati originali di Apollonio erano nei quattro libri successivi.

L'edizione fu curata da uno dei maggiori studiosi del tempo: Edmond Halley, l'amico di Newton cui dobbiamo, tra l'altro,[120] la scoperta (o forse la riscoperta) delle comete periodiche e dell'ellitticità delle loro orbite.[121] L'ottavo libro non è mai stato trovato.[122]

La circostanza che i frammenti di teoria della gravitazione trasmessi da letterati come Plutarco o Seneca siano riferiti in termini qualitativi non implica che Ipparco e gli altri matematici del II secolo a.C. avessero omesso di svilupparne aspetti quantitativi; se lo avessero fatto, essi avrebbero probabilmente proceduto in una direzione non troppo lontana da quella che seguì Newton basandosi sulla conoscenza indiretta e parziale del trattato di Apollonio. Non bisogna infatti dimenticare che la teoria della gravitazione di cui abbiamo cercato di ricostruire alcune idee nel capitolo nono era stata sviluppata pochi decenni dopo Apollonio, nell'ambito della stessa tradizione scientifica, e che probabilmente già Apollonio stesso (almeno quello di Mindo, se non coincideva con l'altro) aveva applicato la teoria delle coniche alle orbite allungate delle comete. È vero che Tolomeo non usa mai le coniche in astronomia, ma è anche vero che egli non solo evita, nell' *Almagesto*, l'argomento delle comete, ma evita anche, nell' *Ottica*, qualsiasi applicazione della teoria delle coniche agli specchi, pur trattandosi di applicazioni usate sistematicamente dall'epoca di Dositeo (III secolo a.C.) fino agli autori arabi.[123]

L'opera di Newton è basata esplicitamente su tutti gli elementi che abbiamo elencato. Se la teoria della gravitazione è riuscita a raggiungere rapidamente lo status di una teoria scientifica, nonostante l'evidente debolezza metodologica dei suoi

[120] Come abbiamo già visto, tra i principali risultati di Halley vi fu anche il completamento dell'esperimento ideato e iniziato da Ipparco sul moto delle stelle (cfr. sopra, n. 150 a p. 279).

[121] [Halley: Apollonio]. Seneca, come abbiamo visto a p. 280, sembra attribuire ad un astronomo di nome Apollonio l'idea che le comete siano corpi celesti simili ai pianeti ma con un'orbita molto allungata. Anche se Apollonio è un nome molto comune, non conosciamo più di due astronomi con questo nome: il famoso Apollonio di Perga e l'Apollonio di Mindo menzionato da Seneca. Mindo e Perga sono due città dell'Asia Minore. I due scienziati, oltre al nome, all'interesse per l'astronomia, alla provenienza dall'Asia Minore e all'epoca (si pensa che siano stati contemporanei) avevano probabilmente condiviso, se non l'identità personale, almeno l'interesse per la teoria delle coniche (che era stato comune a tutti gli astronomi ellenistici).

[122] Come abbiamo già ricordato, nella prefazione al VII libro Apollonio afferma che i teoremi (sui diametri delle coniche) ivi contenuti potevano essere applicati "a molti tipi di problemi" e che esempi di tali applicazioni sarebbero stati inclusi nell'ottavo libro.

[123] Molte altre conoscenze ellenistiche, d'altra parte, erano state ignorate da Tolomeo, come abbiamo visto nei §§ 9.5 e 9.10.

fondamenti, si può sospettare che ciò sia accaduto perché la coerenza tra i diversi elementi era assicurata dalla loro origine comune. Le affermazioni genuinamente aristoteliche, pur se inserite da Newton sin dall'inizio dell'opera, non potevano alterare, per esempio, le dimostrazioni di teoremi sulle coniche effettuate seguendo il modello di Apollonio.

Non è troppo difficile immaginare cosa sarebbe potuta essere una "filosofia naturale" basata sulle idee newtoniane di spazio, di tempo e di forza e privata di tutti gli elementi prima elencati.

Newton era ben consapevole dell'importanza delle conoscenze tramandate dall'antichità, ma l'uso di fonti non scientifiche, congiunto al suo atteggiamento ideologico, gli impedì di riconoscerne l'origine nella scienza ellenistica. Egli attribuiva la profondità del pensiero degli "Antichi", che aveva violentemente colpito la sua immaginazione, a una Verità originaria, preservata nelle tradizioni esoteriche di classi sacerdotali e sette religiose.[124] Ecco come l'origine dell' eliocentrismo viene individuata nel *Sistema del mondo*:

> [La teoria eliocentrica] regnò antichissima fra coloro che si occuparono di filosofia [...] Tale era stato il giudizio dato un tempo da Filolao, Aristarco di Samo, [...], e prima di loro da quel sapientissimo re romano che fu Numa Pompilio. Costui, per simboleggiare la sfericità dell'universo con al centro il fuoco solare, fece erigere il tempio di Vesta di forma circolare e volle che vi si serbasse al centro un fuoco inestinguibile. È però verosimile che questa idea sia stata diffusa dagli Egiziani. Infatti sembra che proprio da questi e dai popoli limitrofi si fosse trasmessa ai Greci, gente più filologica che filosofica, tutta la filosofia più antica e più sana: anche il culto di Vesta ha qualcosa in comune con lo spirito degli Egiziani, i quali, con riti sacri e geroglifici, rappresentavano misteri che travalicavano la comprensione popolare.[125]

Quello della superiorità degli Egizi sui Greci (e dei *riti sacri* e dei *misteri* sulle ricerche razionali) è un *topos* della letteratura ermetica (dalla quale Newton era certamente influen-

[124] La personalità di Newton è oggi più facilmente riconoscibile grazie anche alla recente pubblicazione del suo *Trattato sull'Apocalisse* (Torino, 1994), rimasto finora non solo inedito ma anche segreto. Fino a qualche tempo fa l'immagine tradizionale di Newton era stata difesa anche con l'occultamento di gran parte dei suoi scritti. Quando questi hanno iniziato ad essere pubblicati ha preso piede l'idea di un Newton affetto da una grave forma di sdoppiamento della personalità. Sulla continuità metodologica che in realtà sussiste tra le opere religiose di Newton e i *Principia* è interessante leggere [Mamiani].

[125] I. Newton, *De mundi sytemate liber*, 1 (traduzione di A. Quadrino).

zato[126]), che risale all'epoca della riacquistata supremazia dell'elemento indigeno nell'Egitto tardo-ellenistico.

Affrontiamo ora il punto che apparirà certo a molti l'unico essenziale: la legge di gravitazione "newtoniana", cioè la legge dell'inverso dei quadrati delle distanze, era nota nell'"antichità"? Non avendo le opere di Ipparco, leggiamo innanzitutto cosa ne pensava Newton:

> Secondo la testimonianza di Macrobio, [Pitagora] applicò ai cieli la proporzione che aveva trovato con questi esperimenti. Ossia, confrontando quei pesi con i pesi dei pianeti e la lunghezza delle corde con la distanza dei pianeti, intese con l'armonia celeste che i pesi dei pianeti rispetto al Sole erano inversamente proporzionali al quadrato delle loro distanze dal Sole.[127]

L'opinione di Newton che la legge dell'inverso dei quadrati fosse una conoscenza pitagorica è interessante, anche se i passi di Macrobio su Pitagora non sembrano sufficienti a giustificarla. Su questo argomento Newton aveva probabilmente letto anche altre fonti di tendenza neopitagorica.

L'idea di usare la legge dell'inverso dei quadrati per dedurne le leggi di Keplero era venuta, prima che a Newton, almeno a Hooke nel 1680[128] e a Wren e Halley nel gennaio

[126] Il ruolo dell'ermetismo nella formazione del pensiero scientifico moderno potrebbe non essere stato posto nella giusta luce. È stata studiata l'influenza degli scritti ermetici nel Rinascimento (soprattutto dopo il famoso saggio [Yates]) e anche su scienziati come Copernico o Newton. Non è stata però studiata, a mia conoscenza, l'eventuale influenza di residui della scienza ellenistica sulla letteratura ermetica. Una tale influenza, se provata, aiuterebbe a capire come mai tra i fondatori del pensiero scientifico moderno vi siano stati tanti cultori degli scritti ermetici. Notiamo solo che nel XVI trattato del *Corpus Hermeticum* (trattato che è citato, tra gli altri, da Copernico) è scritto che il Sole attrae a sé tutte le cose e trattiene il mondo come fa un buon auriga con il carro, impedendogli che si allontani (XVI trattato, *Asclepio*, 5, 7). Una ricerca sistematica nella letteratura ermetica, cabalistica, astrologica e alchimistica della quale Newton era appassionato (letteratura che aveva nel neopitagorismo una delle principali radici) probabilmente potrebbe fornire altri passi interessanti.

[127] [Newton, *Scolii classici*], pp. 41- 42.

[128] Hooke aveva esposto la legge in una lettera a Newton del 6 gennaio 1680. La scoperta, da parte di Hooke, della "legge di gravitazione universale di Newton" fu una delle due principali cause della fiera inimicizia di Newton verso di lui. L'altra causa è connessa all'altro principale interesse scientifico di Newton: l'ottica. Hooke infatti, avendo scoperto vari fenomeni di diffrazione e di interferenza, non aveva accettato l'ottica corpuscolare di Newton, ma aveva preferito fondare la teoria ondulatoria della luce. In particolare Hooke aveva scoperto quei fenomeni di interferenza, incompatibili con la teoria newtoniana, che oggi sono detti "anelli di Newton". Hooke si occupò anche di molti altri argomenti: dobbiamo a lui, tra l'altro, sia la scoperta delle cellule che la "legge di Boyle". L'odio del potente Newton ha fatto sì che ancora oggi i manuali as-

1684.[129] La legge in sé era però più antica. Nel 1645 essa era stata enunciata da Boulliau, sulla base della considerazione che la forza del Sole, come la luce e il calore emessi, dovesse diminuire con la distanza in modo inversamente proporzionale all'estensione della regione raggiunta.[130] Le considerazioni di Boulliau non erano però nuove, in quanto erano state sostenute già da Keplero, che aveva però immaginato il problema in due dimensioni (nel piano dell'eclittica), ottenendo così una dipendenza diversa.

Continuando la nostra sommaria storia a ritroso, ricordiamo che la legge dell'inverso dei quadrati era stata già esposta, nel XIII secolo, da Ruggero Bacone, che l'aveva illustrata con la stessa analogia tra forza gravitazionale e propagazione della luce (da lui usata nel corretto contesto tridimensionale).[131]

Dobbiamo concludere che la conoscenza della dipendenza della forza gravitazionale dalla distanza aveva preceduto, nello sviluppo storico medievale e moderno, non solo ogni connessione con le leggi di Keplero, ma anche l'enunciato del secondo principio della dinamica. In altri termini l'andamento con la distanza della forza gravitazionale era già noto non solo prima che fosse utilizzato per spiegare qualsiasi fenomeno, ma anche prima che si stabilisse cosa dovesse veramente intendersi con "forza". Questo strano sviluppo delle idee diviene comprensibile se si ammette che Newton avesse ragione nel considerare la legge molto antica (anche se, indubbiamente, aveva esagerato con il risalire a Pitagora).

Keplero credeva che la "virtù" del Sole, irradiata in linee rette, afferrasse i pianeti per trascinarli nel moto rotatorio.[132] È un'idea molto lontana da quella moderna di forza, ma vicina alla lettera dei passi di Vitruvio e di Plinio. Se l'indebolimento

socino il nome di Hooke solo allo studio delle forze elastiche: i suoi risultati in questo campo consentirono di sostituire, almeno in alcuni casi, alla definizione di forza dei *Principia* quella basata sull'uso del dinamometro.

[129] Come si deduce da una lettera di Halley a Newton. Chiunque può proporsi di scrivere delle lettere interessanti e diverse persone ci riescono; quello di riceverne sistematicamente è invece un obiettivo molto più arduo, che pochi si prefiggono e solo alcuni uomini eccezionali realizzano.

[130] *Ismaeli Bullialdi Astronomia Philolaica*, Parisiis 1645. Un lungo brano di quest'opera, nel quale in particolare è contenuta l'affermazione che ci interessa, è riportato in appendice in A. Koyré, *La révolution astronomique*, Paris 1961. Il riferimento a Filolao nel titolo dell'opera mostra come anche Boulliau intendesse ricostruire l'astronomia *pitagorica*.

[131] L'opera in cui Ruggero Bacone espone la legge fu stampata nel 1614 (*Rogerii Bacconnis Angli Speculа mathematica in qua de specierum multiplicatione, earumdemque in inferioribus virtute agitur*; Francofurti MDCXIV). La legge dell'inverso dei quadrati è nel cap. ii del III libro.

[132] Cfr. il passo dell' *Epitome astronomiae copernicanae* (p. 344) citato a p. 309.

con la distanza non fosse stato suggerito anch'esso da fonti classiche, sarebbe difficile spiegare perché dovrebbe riguardare la "virtù" con funzione di braccio e mano con la quale il Sole afferra i pianeti.

Leggiamo ora un passo di Vitruvio, vicino a quello già discusso nel §9.7:

> Ci risulterà perciò che quel rapporto, con il quale il calore attira tutto a sé, cosicché a causa del calore vediamo elevarsi in altezza anche le messi [...], così, nella stessa proporzione, la potente forza del sole attira a sé i pianeti. [133]

Sappiamo che in questi passi Vitruvio si basa su una fonte scientifica ellenistica, alterandola gravemente. Tentiamo di separare il contributo di Vitruvio dai concetti contenuti nella fonte. Un'opera scientifica difficilmente avrebbe inserito in un ragionamento matematico, tra un rapporto e un triangolo, le considerazioni sulle messi che sono nel testo di Vitruvio. È improbabile, d'altra parte, che l'idea di proporzionalità, che sembra espressa dai termini *ea ratio... eadem ratione*, sia originale di Vitruvio. Possiamo quindi ipotizzare che nella fonte scientifica fosse contenuta un'affermazione quantitativa, espressa mediante un'eguaglianza di rapporti, che collegava la forza esercitata dal Sole sui pianeti con l'irraggiamento di calore. È possibile quindi che si affermasse che la forza decresce con la distanza nella stessa proporzione con cui decresce l'intensità della luce e del calore diffusi e cioè inversamente all'estensione della regione raggiunta: che si affermasse cioè la stessa idea poi sostenuta da Ruggero Bacone, Keplero e Boulliau. Il contesto bidimensionale di Vitruvio può ricordare particolarmente bene l'esposizione di Keplero (che d'altra parte, come abbiamo già notato, parlando della forza esercitata dal Sole sembra quasi citarlo testualmente). Naturalmente l'interpretazione suggerita del passo di Vitruvio è solo una possibilità. Boulliau potrebbe aver tratto le sue idee da qualche altro autore classico o da autori medievali, come Ruggero Bacone. In assenza di fonti antiche, dirette o indirette, però, probabilmente né lui né Bacone né altri avrebbero affrontato il problema della dipendenza dalla distanza di una "forza" della quale non conoscevano ancora il significato.

L'avere scambiato con riflessioni sulla natura quelli che erano tentativi di interpretazione di antichi testi può avere fuorvia-

[133] "Ergo potius ea ratio nobis constabit, quod, fervor quemadmodum omnes res evocat et ad se ducit, ut etiam fructus e terra surgentes in altitudinem per calorem videmus, [...], eadem ratione solis impetus vehemens [...] insequentes stellas ad se perducit" (*De architectura*, IX, i, 12).

to molti storici nello studio dell'evoluzione delle idee della nascente "scienza moderna".

10.8. *Scienza antica e scienza moderna*

Nonostante fosse basata da una parte sulla scienza ellenistica e dall'altra sulla riflessione su prodotti tecnologici anch'essi in larga misura con la stessa origine, la scienza moderna raggiunse abbastanza rapidamente una fase in cui appare molto più "potente". Perché?

Per quanto riguarda la matematica, un vantaggio essenziale della scienza moderna su quella antica è stato spesso individuato nel sistema di numerazione posizionale. Si tratta però di un sistema che gli Europei avevano appreso dagli Arabi, che lo avevano ereditato dagli Indiani, ai quali lo avevano insegnato i matematici ellenistici. Il sistema posizionale, che aveva le sue lontane origini nella matematica paleobabilonese, in epoca ellenistica era stato rielaborato in modo razionale, in particolare da Archimede e da Apollonio, ed era stato usato sistematicamente (soprattutto in base sessagesimale) in trigonometria e in astronomia; come abbiamo già notato, era stato cioè usato per i calcoli necessari per risolvere problemi non risolubili con riga e compasso. Come mai le soluzioni con riga e compasso, anticamente considerate più semplici, furono sostituite dal calcolo numerico in età moderna?

In realtà il calcolo numerico acquistò un deciso sopravvento sui metodi geometrici solo grazie all'uso delle tavole dei logaritmi, pubblicate per la prima volta nel 1614. Fu allora che la nuova possibilità di eseguire rapidamente complessi calcoli numerici invertì il rapporto algebra-geometria della matematica ellenistica: invece di risolvere problemi algebrici con riga e compasso divenne preferibile trasformare in algebrici anche i problemi geometrici. Bastava per questo associare ai punti le loro coordinate. Anche in questo caso non si trattava di un'idea radicalmente nuova: già Apollonio di Perga aveva usato le coordinate che furono poi dette "cartesiane". La novità consistette nel nuovo uso di questo strumento. La funzione del disegno, ridotto a uno "schizzo" della curva che si voleva studiare, era divenuta puramente illustrativa. Per studiare una curva bastava ormai averne l'equazione, da cui si potevano ricavare tutti i risultati desiderati con il calcolo numerico; si poteva così studiare una "fenomenologia matematica" molto più estesa.

Dobbiamo quindi concludere che la matematica dell'età moderna ha basato la sua superiorità sulla nuova idea di logaritmo? Certamente no. L'idea di usare i logaritmi, l'idea cioè che

esprimendo i numeri come potenze della stessa base si può abbassare il rango dell'operazione effettuando i calcoli sugli esponenti, non solo è abbastanza banale ma è anche lucidamente espressa, in modo quasi incidentale, da Archimede nell'*Arenario*. Né è nuova l'idea di compilare tavole numeriche: gli astronomi ellenistici avevano usato tavole trigonometriche. In età moderna vengono però compilate tavole numeriche (e in particolare tavole di logaritmi) con una precisione e un dettaglio che non ha confronto nel passato. Solo il nuovo tipo di tavole può rendere obsolete le tecniche geometriche di calcolo, ma compilarle richiede un lavoro enorme, che è insensato se l'utilizzazione prevista non supera una certa soglia. La novità essenziale non consiste quindi in idee nuove, ma nell'allargamento del numero degli utilizzatori dei metodi scientifici.

Credo che quello dei mezzi di calcolo sia un esempio di un fenomeno molto più generale: gli elementi di superiorità della scienza moderna non poggiano su idee radicalmente nuove, ma piuttosto sul fatto che frammenti dell'antica cultura hanno di nuovo nell'Europa moderna la possibilità di interagire e di svilupparsi, con il vantaggio di potersi avvalere di una base sociale molto più ampia, che permette di disporre di una quantità di dati molto più vasta. La scienza moderna ha però allo stesso tempo un grave elemento di debolezza: quello di basare i propri risultati sull'acquisizione di elementi esterni, elaborati da una civiltà diversa e non completamente compresi.

Non stupisce quindi che la scienza di Descartes, Keplero e Newton, nonostante la sua potenziale superiorità, dovuta alla sua applicabilità a una fenomenologia più vasta, fosse metodologicamente inferiore a quella antica. Nelle opere della nascente scienza moderna i singoli contenuti recuperati dall'antica scienza sono inquadrati in schemi generali estranei, tratti in genere dalla teologia o dalla filosofia naturale. La sfera di cristallo delle stelle fisse, che era nata per spiegare il moto diurno solidale del firmamento ed era stata abbandonata all'epoca di Eraclide Pontico, quando si era ipotizzata la rotazione terrestre, non scompare con l'accettazione dell'eliocentrismo, ma avvolge ancora l'universo di Keplero. Allo stesso modo Newton cerca di inquadrare la "nuova" scienza in categorie aristoteliche, conservando in particolare una concezione dello spazio assoluto che è virtualmente incompatibile con il principio di inerzia. L'evoluzione verso vere "teorie scientifiche" è tuttavia assicurata, poiché la struttura della scienza viene determinata da quegli aspetti tecnici che gli autori moderni attingono ai trattati ellenistici sopravvissuti.

Il livello del rigore matematico rimase a lungo lontano da quello ellenistico. Vediamo come Newton discute la questione

del limite del rapporto di due quantità infinitesime, ossia, nella sua terminologia, l'"ultimo rapporto" (o "ultima ragione") di quantità *evanescenti* :

> Se nel séguito mi capiterà di considerare le quantità come costituite da particelle determinate, [...] vorrò significare non particelle indivisibili ma divisibili evanescenti, [...]
> Si obietta che non esiste l'ultimo rapporto di quantità evanescenti, in quanto esso, prima che le quantità siano svanite non è l'ultimo, e allorché sono svanite non c'è affatto. [...] La risposta è facile: [...] per ultime ragioni delle quantità evanescenti si deve intendere il rapporto delle quantità non prima di diventare nulle e non dopo, ma quello col quale si annullano.[134]

Newton concepisce le quantità "evanescenti" come oggetti reali, che variano nel tempo reale: la loro "ultima ragione" (ossia, nel nostro linguaggio, il limite del loro rapporto) è il valore assunto dal rapporto nel momento in cui le due quantità si annullano. È chiaro che Newton non ha alcuna consapevolezza di usare un "modello matematico". Non a caso il suo "metodo delle ultime ragioni" è parte della sua "filosofia della natura". Si era evidentemente ancora lontani dalla metodologia che duemila anni prima aveva consentito ad Archimede il confronto tra infinitesimi di diverso ordine all'interno di un modello assiomatico-deduttivo rigoroso.[135]

Ecco come il rapporto tra metodi infinitesimali antichi e moderni è descritto nella *Storia della matematica* di Boyer:

> Stevino, Keplero e Galileo avevano tutti bisogno di ricorrere ai metodi archimedei ma, a causa della loro mentalità pratica, preferivano evitare le sottigliezze logiche del metodo di esaustione. Furono in gran parte le modificazioni introdotte per esigenze pratiche nei metodi infinitesimali degli antichi che alla fine portarono alla creazione del calcolo infinitesimale.[136]

Non è troppo difficile spiegare come mai il moderno calcolo infinitesimale potesse funzionare nonostante l'assenza di "sottigliezze logiche" (nonostante, cioè, per dirla più brutalmente, fosse logicamente contraddittorio). Probabilmente ciò dipendeva dalla circostanza che era stato "creato" (per usare la terminologia di Boyer) proprio eliminando le "sottigliezze logiche" da una vera teoria scientifica.

[134] Newton, *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, libro I, sez. I.
[135] Cfr. per esempio Archimede, *Sulle spirali* (ed. Mugler), 5, dove il confronto tra infinitesimi di diverso ordine è un passo importante per determinare, in ogni punto di una spirale, la direzione della tangente alla curva (per fondare, cioè, la geometria differenziale).
[136] [Boyer], p. 372.

Nel moderno "calcolo infinitesimale per persone dalla mentalità pratica" si consideravano direttamente quantità "infinite" o "infinitesime", poiché non si era in grado di ottenere dimostrazioni rigorose usando solo quantità finite, come abbiamo visto fare a Euclide e ad Archimede e come farà di nuovo l'analisi matematica contemporanea. Fu allora che, a opera di "matematici con la mentalità pratica", nacque l'idea che gli "Antichi" non avessero capito l'infinito.[137] Questa idea è sopravvissuta, nelle concezioni di molti storici della matematica, al recupero del rigore dei metodi infinitesimali avvenuto alla fine dell'Ottocento.[138]

10.9. *La rimozione della scienza antica*

Ogni recupero di antiche conoscenze aveva comportato una certa perdita di memoria storica. L'assimilazione di antiche idee consiste infatti nel trasferirle nel linguaggio della propria cultura, riversandole in opere che tendono a sostituire quelle originali, che vengono spesso dimenticate. Ciascuno dei "rinascimenti" di cui abbiamo parlato nel §10.1 aveva portato a una parziale sostituzione di opere precedenti su particolari argomenti tecnici con opere più moderne (in molti casi di livello inferiore), a volte limitando la diffusione delle opere più antiche, altre volte provocandone la completa perdita. Così nel periodo imperiale l'opera di Erone sugli automi aveva fatto scomparire quella di Filone sullo stesso argomento e la riacquisizione delle antiche conoscenze sulla rifrazione sembra accompagnarsi, all'inizio del Seicento, alla perdita dell' *Ottica* di Tolomeo.[139] Analogamente l'opera di Gilbert aveva reso obsoleto il trattato di Pietro Peregrino sul magnetismo e la bussola[140] e si può sospettare che lo scritto

[137] Naturalmente quando nell'età moderna si iniziò il recupero del metodo scientifico, riapparvero dei matematici che, secondo molti storici, "non capivano l'infinito". Boyer afferma con apparente stupore che "sembra che tanto Gauss quanto Cauchy nutrissero una sorta di *horror infiniti*" ([Boyer], p. 598).

[138] Cfr. l'affermazione di Kline riportata a p. 61.

[139] Cfr. sopra, p. 299.

[140] La famosa opera *De Magnete...* di Gilbert (Londra, 1600) deve molto, come lo stesso Gilbert riconosce, al trattato sullo stesso argomento scritto in forma di epistola da Pietro Peregrino nel 1269 (*Epistola Petri Peregrini Maricurtensis ad Sygerum de Foucaucourt militem, de magnete; actum in castris, in obsidione Lucerae, anno Domini MCCLXIX, viii die Augusti*). Cfr., ad esempio, [Crombie], pp. 103-104. La conservazione dell'opera di Pietro Peregrino fino ai nostri giorni è stata favorita dalla circostanza che essa fu stampata nel 1558, prima di essere resa obsoleta dal trattato di Gilbert.

di Pietro Peregrino avesse a sua volta causato la perdita di opere più antiche sullo stesso argomento.[141]

In nessuno dei casi precedenti era stata però messa in dubbio l'essenzialità dello studio delle antiche fonti greche nel loro complesso. L'ammirazione per l'antica scienza era passata inalterata dagli autori di età imperiale ai Bizantini e agli Arabi ed era rinata in Europa nel XIII secolo, con l'entusiasmo che abbiamo visto in Ruggero Bacone,[142] conservandosi poi, come sappiamo, sia all'epoca di Della Porta e Galileo, sia nelle opere di Newton.

Nel Settecento accadde qualcosa di radicalmente nuovo. Per la prima volta si era riusciti a costruire delle teorie coerenti, che si poteva sperare di sviluppare con il solo aiuto dei "lumi" della ragione, senza basarsi in modo essenziale e continuo sull'esegesi di antiche fonti mal comprese. La scienza europea, convinta di poter finalmente camminare con le proprie gambe visse, attraverso l'ideologia illuministica, un violento fenomeno di rigetto dell'antica cultura da cui era nata e di rimozione del suo ricordo. Fu allora che ci si convinse che la pneumatica fosse nata con Torricelli, seppellendo le opere pneumatiche di Erone e di Filone di Bisanzio nell'oblio in cui sono sostanzialmente rimaste fino ad ora[143]; l'idea eliocentrica, che da sempre era stata legata al nome del suo ideatore Aristarco,[144] divenne l'idea "copernicana" e Aristarco fu relegato nel ruolo di prematuro "precursore".[145] Tutti i ritrovati tecnologici ellenistici furono considerati dei "precursori" delle loro imitazioni moderne. La storia millenaria di riflessioni sulla gravitazione fu cancellata anch'essa dalla coscienza collettiva, che accettò che si fosse trattato di un parto improvviso del genio di Newton.[146] Il

[141] Mi sembra che questo sospetto possa essere suggerito dall'ambiente in cui nasce il trattato di Pietro Peregrino (che scrive la sua lettera sul magnetismo mentre, al servizio degli Angiò, partecipa all'assedio di Lucera). Conoscenze teoriche sul magnetismo e la bussola appaiono nel XIII secolo anche in opere di altri autori (per esempio in quelle di Ruggero Bacone e di Alberto Magno); abbiamo già notato che l'Italia meridionale, e in particolare la corte degli Angiò, era stata nel XIII secolo uno dei principali centri di diffusione delle antiche conoscenze. La bussola è attestata nel I secolo d.C. in Cina (dove, essendo la navigazione solo fluviale e costiera, fu ben poco utilizzata).

[142] Cfr. sopra, p. 151.

[143] Cfr. ad esempio [Prager: Filone], p. 31.

[144] Nel 1644 il libro scritto da Roberval per sostenere l'eliocentrismo si intitolava *Aristarchi Samii de mundi systemate partibus...* Libert Fromond aveva sostenuto la tesi opposta nel libro *Anti-Aristarchus*, pubblicato nel 1631. Questi titoli sono ricordati da Heath nella prefazione di [Heath: Aristarchus].

[145] Come risulta anche dal titolo del (bel) libro di Heath già citato, *Aristarchus of Samos. The ancient Copernicus*, Aristarco è in genere oggetto di stupita ammirazione per essere riuscito ad essere già "copernicano", nonostante fosse nato tanti secoli prima del suo lontano seguace.

[146] Per una ricostruzione della storia antica dell'idea cfr. sopra, §9.8. Molte notizie sulla storia medievale e moderna della gravitazione (accennata nel §10.7, pp. 325-326) sono in [Duhem TP], pp. 336-384.

nuovo atteggiamento è bene illustrato dalla storiella della mela di Newton[147]: una leggenda diffusa da Voltaire,[148] che fu tra i più attivi e violenti nell'opera di rimozione del passato. Newton divenne l'etichetta di un incredibile numero di idee; ne abbiamo visto già diversi esempi; aggiungiamo solo che tra gli oggetti etichettati come "newtoniani" vi fu addirittura una delle antiche *sette meraviglie del mondo*: i fari furono infatti chiamati nel Settecento *torri newtoniane*.

Naturalmente per accreditare la nuova immagine dello sviluppo della scienza si dovette dimenticare il ruolo essenziale di intermediari tra l'antica cultura e la civiltà moderna svolto dai tanti intellettuali che, come Crisogono, Boulliau o de Dominis, avevano incluso nelle proprie opere importanti risultati della scienza successiva, ma in un contesto palesemente inadeguato a spiegarne l'origine. Non solo; fu anche necessario occultare molti scritti di Newton: in particolare quelli in cui le idee ormai accreditategli come un parto improvviso del suo genio venivano da lui stesso attribuite a Pitagora o agli antichi Egizi.[149]

Ancora nell'Ottocento la superiorità della scienza e della tecnologia moderne su quelle antiche era rivendicata con un'enfasi che può stupire il lettore di oggi.

Dopo la svolta illuministica l'antica cultura continuò a influenzare in modo essenziale la scienza europea, ma, come accade alle esperienze rimosse nel caso degli individui, in modo inconsapevole. Molti importanti scienziati furono anche archeologi e grecisti (come Joseph Fourier e Thomas Young); gli altri, come abbiamo visto nel caso dei due Darwin e di Freud, erano comunque dotati di cultura classica e leggevano le antiche opere. L'influenza dello studio delle fonti greche sullo sviluppo scientifico rimase però spesso inavvertita agli stessi studiosi. Ne abbiamo già visto diversi esempi e ne vedremo qualche altro nel prossimo paragrafo.

[147] Si tratta ovviamente di una storiella assurda, che nessuno storico della scienza ha mai preso sul serio. Mi sembra tuttavia che la fortuna popolare dell'aneddoto sia significativa. Non si può infatti sentir parlare della "gravitazione universale" senza chiedersi da quali osservazioni sia nata un'idea così lontana dall'esperienza comune come quella che tutti i corpi si attirino tra di loro. È però del tutto impossibile ricostruire la genesi di quest'idea nell'ambito della scienza moderna, alla quale era stata tramandata da un'antica tradizione. La rimozione della storia millenaria della gravitazione aveva quindi lasciato un vuoto che andava riempito in qualche modo: agli sprovveduti si poteva anche dire che era bastato che un genio osservasse la caduta di una mela.

[148] L'aneddoto è raccontato da Voltaire nella quindicesima delle *Lettres philosophiques*.

[149] Cfr. sopra, pp. 324-325.

10.10. *Recupero (e crisi) della metodologia scientifica*

Nell'evoluzione della meccanica moderna un passo importante dal punto di vista metodologico fu l'introduzione dei "principi variazionali". Questi consentono di formulare i problemi di dinamica non come "problemi di Cauchy" (cioè come ricerca di soluzioni di equazioni differenziali ordinarie con date condizioni iniziali) ma come "problemi di minimo" relativi a opportuni funzionali. Ciò significa che per la prima volta non si deduceva il futuro dal passato (che ne rappresentava, almeno inconsapevolmente, la "causa"), ma si trovava una formulazione che permetteva, in linea di principio, di determinare tutto il moto simultaneamente. Questo modo "radicalmente nuovo" di porre il problema fu derivato dalla analoga descrizione che nel caso dell'ottica ci era stata tramandata da Erone di Alessandria.[150] Era naturale attingere idee dalla scienza ellenistica per tentare di riportare anche i progressi fatti nella moderna dinamica nell'ambito di quella lucida impostazione geometrica con la quale la meccanica era nata nei lavori di Archimede.

Il recupero della scienza è stato tanto più lento quanto più ci si avvicinava ai suoi risultati più profondi, che sono quelli metodologici.

Quanto abbiamo detto per Descartes, Keplero e Newton vale anche per l'immagine che di Euclide stesso si erano fatti i matematici moderni. La sopravvivenza dell'opera di Euclide in civiltà in cui si era completamente perduta la nozione di "teoria scientifica", e quindi la comprensione del rapporto tra teoria e oggetti concreti, aveva infatti inserito anche gli *Elementi* all'interno di un quadro concettuale prescientifico.

Non furono più chiari i criteri per la formulazione dei postulati, come è dimostrato dal fatto che alle tante teorie assiomatico-deduttive ellenistiche non corrispose nessuna costruzione confrontabile nell'età moderna fino alla fine dell'Ottocento. I cinque postulati di Euclide, in particolare, non furono più concepiti come la base di un modello matematico dell'uso dei due strumenti della riga e del compasso, ma come delle "Verità". Si considerarono accettabili solo i primi quattro, per la maggiore "evidenza" della loro "Verità", e si cercò per secoli di dedurre da loro il quinto. Tali vani tentativi, iniziati già in epoca imperiale,[151]

[150] Erone, *De speculis*, 4. Cfr. sopra, p. 84.

[151] Proclo attribuisce una "dimostrazione" del V postulato a Tolomeo (Proclo, *In primum Euclidis elem. libr. comm.* (ed. G. Friedlein), 362, 12-363, 18; 365, 5-367, 27); un'altra pseudodimostrazione fu prodotta da Proclo stesso (Proclo, *op. cit.*, 371, 23-373, 2). Un tentativo precedente era stato fatto da Gemino, come sappiamo dal commento agli *Elementi* di an-Nairīzī (cfr. [Heath, HGM], vol. 2, pp. 228-230).

approdarono finalmente, nel XIX secolo, con Lobačevskij,[152] alle cosiddette "geometrie non euclidee". Lobačevskij scoprì infatti, come è ben noto, la possibilità di negare il V postulato di Euclide ottenendo delle teorie non contraddittorie.

Prima di Lobačevskij (e di Gauss) una geometria non-euclidea era stata comunque già sviluppata, anche se inconsapevolmente. Lambert, infatti, nella sua opera *Die Theorie der Parallellinien*, del 1766, aveva considerato la possibilità che in un quadrilatero con tre angoli retti il quarto angolo fosse acuto o ottuso; ne aveva dedotto, pur senza rendersene conto, delle geometrie non euclidee.[153] È sempre stata chiara l'importanza di quest'opera nell'aprire la strada alle geometrie consapevolmente non euclidee di alcuni decenni dopo. Lambert scrive:

> Mi sembra notevole che la seconda ipotesi [quella dell'angolo ottuso] sia valida se invece di un triangolo piano consideriamo un triangolo sferico, poiché la somma dei suoi angoli è maggiore di 180 gradi.[154]

L'osservazione di Lambert è veramente notevole: essa equivale infatti all'affermazione (certo inconsapevole) che la sua geometria caratterizzata dal "quarto angolo ottuso" coincide con l'antica geometria sferica, della quale Lambert aveva in realtà ridimostrato alcuni teoremi classici.

La *Sphaerica* di Menelao (I secolo d.C.) può essere considerata la più antica opera di "geometria non euclidea" pervenutaci. Nell'opera di Menelao, infatti, la superficie sferica non viene studiata come una figura immersa nello spazio tridimensionale, ma esaminandone le proprietà "intrinseche".[155] I teoremi (in particolare quelli sui triangoli sferici) sono dimostrati cioè seguendo lo schema della geometria piana degli *Elementi* (interpretando le *linee dritte* di Euclide, ossia i nostri *segmenti*, come archi di cerchi massimi), salvo naturalmente quelli dipendenti dall'esistenza della parallela a una retta data passante per un punto assegnato, che vengono sostituiti dai teoremi diversi che sono validi nella nuova teoria.

[152] L'opera di Lobačevskij fu in realtà preceduta da osservazioni di Gauss (in lettere private, la prima delle quali risale al 1799) e fu seguita, a pochi anni di distanza, da quella, indipendente e sostanzialmente equivalente, di Bolyai.

[153] Già precedenti tentativi di dimostrare per assurdo il V postulato di Euclide avevano portato a sviluppi che precorrevano le geometrie non euclidee, in particolare nell'opera di Saccheri. L'opera di Lambert è però particolarmente interessante, soprattutto per l'influenza che ebbe sugli sviluppi successivi.

[154] J. H. Lambert, *Die Theorie der Parallellinien*. Il brano è in [Rosenfeld], p. 101.

[155] Alcuni teoremi di geometria sferica intrinseca erano però già nell'opera di Teodosio (cfr. sopra, p. 78, n. 73).

La domanda sulla possibilità di costruire geometrie coerenti contenenti una "teoria delle parallele" diversa da quella degli *Elementi* (domanda che ci ha assillato per tanti secoli) non sarebbe stata quindi neppure proponibile in epoca ellenistica, giacché tale possibilità era resa evidente dall'esistenza della geometria sferica intrinseca. [156] Si può quindi immaginare che un rilevante contributo al riconoscimento della possibilità di geometrie alternative a quella di Euclide possa essere venuto dallo studio dell'opera di Menelao, nella quale una tale geometria alternativa era esplicitamente costruita. La prima edizione moderna della *Sphaerica* di Menelao (che contiene, tra l'altro, il teorema citato da Lambert sull' "eccesso della somma degli angoli" di un triangolo sferico), essendo stata pubblicata a Oxford nel 1758, aveva preceduto di otto anni l'opera di Lambert. [157]

Anche la successiva geometria non euclidea è in stretta relazione con l'antica geometria sferica, alla quale non a caso Lobačevskij dedica una considerevole parte dei suoi *Nuovi principi della geometria*. Lobačevskij, analizzando criticamente il sistema euclideo di postulati, compì certo un'impresa di importanza storica, ma proprio per la propria appartenenza a una civiltà che non aveva ancora elaborato alcun sistema assiomatico confrontabile con quelli ellenistici.

La lentezza del recupero del metodo scientifico è in genere tenuta ben nascosta. Ad esempio agli studenti che, studiando l'analisi matematica, incontrano in tanti teoremi il nome di Cauchy non si dice mai che gli enunciati da loro studiati non corrispondevano a veri teoremi nei lavori di Cauchy. L'oggetto degli studi di Cauchy, infatti, non erano più le "grandezze" geometriche euclidee, ma quantità numeriche, per le quali però non esisteva ancora una teoria rigorosa analoga a quella di Euclide. [158] Come abbiamo già osservato nel §2.5, l'analisi matematica divenne una vera "teoria scientifica" solo grazie al recupero della

[156] Per gli amanti dell'esattezza va precisato che nella geometria sferica (nella quale non esistono "rette" parallele) occorre abbandonare non il V postulato nella sua formulazione originale, ma una assunzione fatta implicitamente da Euclide nella dimostrazione della prop. I, 16. Si può obiettare che in realtà occorre modificare anche il I postulato, poiché interpretando le "rette" come cerchi massimi nel caso della geometria sferica l'unicità della retta passante per due punti distinti viene meno nel caso di due punti opposti. Questa obiezione può tuttavia essere superata identificando le coppie di punti antipodali.

[157] Il testo greco dell'opera di Menelao è perduto. L'edizione del 1758, curata da Halley, contiene una traduzione latina basata su manoscritti arabi ed ebraici. Il teorema citato è la prop. xi del I libro.

[158] Ad esempio il "criterio di Cauchy" per la convergenza di una successione non può essere dimostrato se non si ha (come Cauchy non aveva) una teoria dei numeri reali.

teoria euclidea delle proporzioni, completato da Weierstrass e Dedekind nel 1872.

Fino a questo punto, comunque, mentre la matematica si era di molto estesa, soprattutto nella direzione dell'analisi, il massimo del rigore che era riuscita a ottenere alla sua base era stato quello di Euclide, che rimaneva insuperato dopo ventidue secoli. Per chiudere i conti con questo ingombrante personaggio occorreva affrontarlo finalmente sul suo campo, migliorando il suo sistema di postulati. Ci provò per la prima volta David Hilbert nel 1899 con le *Grundlagen der Geometrie.*[159] Nello stesso periodo non solo Peano formula la sua assiomatizzazione dell' aritmetica e altri sistemi assiomatici vengono creati per varie branche della matematica, ma rinascono anche varie altre teorie ellenistiche: non solo, come abbiamo visto, la logica proposizionale, la semantica e la "teoria dei sogni", ma anche, ad esempio, la nuova psicologia della percezione, basata su quell'assenso attivo del soggetto che Crisippo aveva chiamato συγκατάθεσις.[160] In tutti questi sviluppi il contributo essenziale venne da quella stessa cultura di lingua tedesca cui dobbiamo, nello stesso periodo, anche i principali risultati della filologia classica.

Nel campo della scienza esatta l'enorme sviluppo della fenomenologia ci ha posto però l'esigenza di nuove teorie scientifiche, per la cui costruzione non potevamo più aiutarci né studiando Archimede né sfogliando tutti i *Moralia* di Plutarco. In particolare la microfisica si è rivelata non descrivibile con la teoria scientifica della "meccanica classica": i suoi fenomeni sono risultati, infatti, non descrivibili né con la meccanica corpuscolare né con quella ondulatoria. Occorreva evidentemente una terza teoria, ma il modo in cui questa si è formata e sviluppata mostra quanto sia stata grave la perdita di quella sicura guida che ci aveva sorretto fino ad allora. Invece di proporre una terza "teoria scientifica", scienziati come de Broglie e Bohr enunciarono infatti il "dualismo onda-corpuscolo" e il "principio di complementarità". Di fronte all'inapplicabilità di due teorie incompatibili tra loro, una cultura che confondeva ancora gli enti della teoria con gli oggetti reali trovò cioè del tutto normale

[159] Il lavoro di Hilbert concluse un intenso lavoro iniziato da altri, in particolare da Pasch e da Peano. Senza dubbio Hilbert provò a migliorare il sistema euclideo di postulati. Quanto al fatto che ci sia riuscito, il giudizio è opinabile. Il suo sistema di postulati è certamente molto più complesso di quello di Euclide e credo che pochi matematici conoscano dei teoremi interessanti sviluppati sulla sua base.

[160] Cfr. sopra, p. 204. La "nuova" psicologia nacque grazie a Franz Brentano (1838-1917), i cui due principali interessi furono la psicologia e la storia della filosofia antica.

attribuire alla natura la contraddittorietà della propria scienza. Naturalmente costruzioni intellettuali del genere, basate sulla negazione del principio di non contraddizione, rivendicarono la propria appartenenza a una "fisica" ben lontana dalla matematica. Non a caso de Broglie scrive:

> Nell'esposizione delle teorie scientifiche, escludendo forse il campo della matematica pura, il metodo "assiomatico" è il più soddisfacente per la nostra ragione, ma in pratica il meno fecondo.[161]

Dobbiamo dedurne che per l'ideatore del "dualismo onda-corpuscolo" il dare soddisfazione alla ragione fosse un pericoloso freno allo sviluppo della scienza. Le idee di de Broglie affondano le loro radici in antiche tradizioni, che sono chiare a Niels Bohr, che nel suo saggio *The Unity of Human Knowledge*, del 1960, illustra il suo "principio di complementarità" tra l'altro con le parole seguenti:

> Indeed, in renouncing logical analysis to an increasing degree and in turn allowing the play on all string of emotion, poetry, painting and music contain possibilities of bridging between extreme modes as those characterized as pragmatic and mystic. Conversely, already ancient Indian thinkers understood the logical difficulties in giving exhaustive expression for such wholeness.[162] [...]
> It is equally clear that compassion can bring everyone in conflict with any concisely formulated idea of justice. We are here confronted with complementary relationships inherent in the human position, and unforgettably expressed in old Chinese philosophy, reminding us that in the great drama of existence we are ourselves both actors and spectators.[163]

Si può immaginare che quando nella scuola pitagorica fu trovata la famosa aporia relativa alla diagonale del quadrato, vi sia stato qualcuno che, rifacendosi come Bohr all'inevitabile contraddittorietà del mondo e a qualche tradizione di pensiero orientale, propose di uscire dall'*impasse* riconoscendo alla diagonale una natura profondamente ambigua, proponendo cioè un *dualismo* (o una *complementarità*) pari-dispari.

Le tradizioni che avevano sommerso la scienza in età imperiale sono evidentemente ancora ben vive nel XX secolo e ridivengono più forti quando viene meno la possibilità di attingere all'antica scienza. La lucida "razionalità cartesiana" è ben difficile da conservare quando non si può più ricorrere a Pappo.

[161] [de Broglie], p. 170.
[162] [Bohr], p. 14.
[163] [Bohr], p. 15.

Epilogo

Gli scienziati che tra la seconda metà del XIX secolo e l'inizio del XX crearono ciò che viene generalmente considerata la scienza moderna, uomini cioè come Helmholtz, Boltzmann, Poincaré, o ancora Born, avevano ricevuto una formazione "classica", della quale era parte essenziale la geometria euclidea, che trasmetteva il metodo dimostrativo e la capacità di usare consapevolmente modelli teorici del mondo concreto. [1]

Uno degli scopi di questo saggio è quello di suggerire che possa esservi un legame tra la crisi del rapporto con la civiltà classica e la crisi della scienza, che, seguendo quella di altri settori della cultura, ha accelerato i tempi negli ultimi decenni del XX secolo. Oggi, mentre il filo che ci legava all'antica civiltà rischia di spezzarsi definitivamente, l'irrazionalismo sembra aver conseguito vittorie che Bohr non avrebbe neppure sospettato: astrologi e maghi di ogni tipo non hanno solo conquistato il grande pubblico, ma anche posizioni di prestigio impensabili ancora pochi anni fa, come la cattedra di astrologia istituita alla Sorbona.

Anche nei licei europei (come era già avvenuto in quelli americani) l'antico metodo dimostrativo sta scomparendo insieme alla geometria euclidea che ne aveva fornito da sempre il supporto. Come in epoca imperiale, i concetti teorici, avulsi dalle teorie in cui hanno il proprio significato e considerati oggetti reali la cui esistenza appare solo all'iniziato, vengono usati per

[1] Max Born, lamentandosi di aver dovuto studiare teoremi di geometria euclidea quando era troppo giovane, sostiene di essere riuscito ad apprezzare per la prima volta il metodo di Euclide ascoltando le lezioni di David Hilbert a Gottinga ([Born], pp. 55-56). Born avrebbe avuto però ben poco da apprezzare se lui e Hilbert non avessero imparato entrambi il metodo dimostrativo euclideo sui banchi di scuola.

la stupefazione del pubblico. Nei corsi di fisica lo studente (che non conosce più le basi sperimentali dell'eliocentrismo o della teoria atomica, accettati sulla sola base del principio di autorità) viene assuefatto a una complessa e misteriosa mitologia, con *orbitali* che si *ibridano* tra loro, sfuggenti *quark*, voraci e inquietanti *buchi neri* e un *Big Bang* creatore: tutti oggetti introdotti in teorie che gli sono totalmente ignote e che non hanno alcuna relazione comprensibile con fenomeni a lui accessibili.[2] Il metodo "scientifico" così trasmesso consiste nell'accettazione passiva del mistero e delle contraddizioni e nella rinunzia a spiegazioni razionali della realtà. L'Italia è all'avanguardia nel processo che stiamo descrivendo; ad esempio siamo stati i primi a usare il termine *teorema* per indicare una *fandonia calunniosa dedotta con sofismi*.

La diffusa ignoranza della storia del pensiero e il mito di un progresso continuo consentono di presentare gli argomenti contro il *vecchio* razionalismo come superiori *in quanto nuovi*. In realtà non si tratta di argomenti recenti, ma, in buona sostanza, della riproposizione delle stesse polemiche antirazionalistiche che nei primi secoli della nostra era avevano accompagnato la fine della scienza antica. Le versioni divulgate al grande pubblico della meccanica quantistica si sono sempre basate sull' antica scelta di accettare una descrizione contraddittoria della realtà.[3] Più di recente si è diffusa l'idea che la realtà sia troppo *complessa* per essere capita da menti umane[4]: una concezione anch'essa già vittoriosa nei primi secoli della nostra era. I propugnatori del nuovo irrazionalismo ostentano particolare disprezzo

[2] La teoria dell'evoluzione biologica basata sulla selezione naturale è invece, allo stesso tempo, contestata sempre più da biologi creazionisti e bandita da un numero crescente di scuole degli Usa. Poiché in questo caso si tratta di una teoria che (almeno nelle sue linee fondamentali) è basata su concetti semplici ed è illustrabile con un'abbondante fenomenologia, il suo abbandono a favore di teorie mitiche è metodologicamente coerente con l'accettazione passiva di *buchi neri* e *Big Bang*.

[3] Va notato che questo *grande pubblico* contiene gran parte dei cosiddetti *scienziati*. Infatti la preparazione dei biologi e della massima parte dei chimici non prevede corsi "seri" di meccanica quantistica. Fin dal primo corso di chimica inorganica viene loro trasmessa la versione "vulgata" della meccanica quantistica, basata sulla violazione del principio di non contraddizione. Per i fisici il discorso è più complesso, ma naturalmente vi è una coerenza di fondo, come in ogni cultura, tra le versioni divulgate e quelle più raffinate della stessa teoria (come è mostrato del resto anche dalle frasi di Bohr riportate a p. 238).

[4] Ovviamente non intendo negare la scientificità di molti risultati usualmente raccolti sotto l'etichetta di "teoria della complessità" (risalenti peraltro in larga misura a Poincaré), ma mi riferisco alla funzione ideologica svolta dall'etichetta (alla quale in realtà non corrisponde alcuna teoria unitaria ben definita).

verso teorie quali la logica classica e la geometria euclidea. Evidentemente il nemico da battere è ancora lo stesso.

L'irrazionalismo si diffonde sempre più anche tra gli scienziati. La concezione di una successione di nascite e morti di universi (evidentemente reciprocamente inconoscibili) è stata sostenuta da un premio Nobel per la fisica, probabilmente inconsapevole di riecheggiare idee di Anassimandro: un significativo incontro tra chi procedeva verso la scienza e chi, provenendone, si muove nella direzione opposta. L'idea che il nostro Universo possa essere il prodotto dell'attività razionale di un normale individuo appartenente a un altro Universo, idea sorta dalla contaminazione di elementi religiosi e fantastici e sfruttata in tanti racconti di fantascienza, è stata fatta propria dall'astrofisico Edward Harison.[5] La speranza che i *buchi neri* possano costituire una sorta di passaggio tra due diversi punti dello spazio-tempo (oppure, per chi lo preferisce, tra *universi paralleli*) è nata anch'essa nella fantascienza popolare, ma sembra oggi assorbita anche da alcuni cosmologi. Il premio Nobel per la chimica Kary Mullis ha pensato di usare la sua tecnica di duplicazione del Dna per produrre a ritmo industriale reliquie di divi defunti. Anche in questo caso residui scientifici vengono usati all'interno di un quadro concettuale che solo ottimisticamente può definirsi "alto-medievale". L'attuale crisi scientifica non può essere analizzata in questa sede. Occorrerebbe almeno un altro libro per inserire i casi qui accennati in una spirale coerente di degrado basata sulle influenze reciproche che, a mio parere, legano strettamente la crescita esponenziale del numero dei ricercatori e degli articoli scientifici pubblicati, l'abbassamento, anch'esso esponenziale, del loro livello medio, il ruolo crescente di mode scientifiche effimere, l'imporsi del relativismo nel dibattito epistemologico e la profonda trasformazione del ruolo sociale della scienza, che si sposta sempre più dalla produzione al consumo.[6] Le analogie con la fine della scienza antica potrebbero facilmente moltiplicarsi. Ricordiamo solo l'esodo degli scienziati dall'ex Unione Sovietica, che ha annientato istantaneamente una delle scuole scientifiche più prestigiose di questo

[5] Apprendo questa notizia, che mi era sfuggita, da un articolo di Margherita Hack sul "Corriere della sera" del 1°.10.1995, nel quale anche la Hack sembra aver abbandonato il suo abituale ottimismo sul futuro della razionalità scientifica.

[6] Ad esempio gli innumerevoli convegni scientifici svolgono oggi sopratutto un'importante funzione di sostegno del mercato turistico, sia dando lavoro a strutture specializzate nel "turismo congressuale", sia elevando l'uso delle strutture alberghiere generiche nella bassa stagione. Molti settori di punta della ricerca, in particolare nel campo della fisica, hanno affiancato da tempo alla funzione tradizionale di fornitori un ruolo crescente di consumatori di alta tecnologia.

secolo, e l'inizio della "caccia allo scienziato" negli Usa [7]: due eventi con strette e sinistre analogie nella storia antica.

È dubbio che il metodo scientifico, avulso dalla cultura che lo aveva generato, possa sopravvivere a lungo nel terzo millennio. La moderna tecnologia può accelerare i processi accennati, [8] ma ben difficilmente potrebbe sopravvivere al loro compimento.

[7] Mi riferisco alle sette antiscientifiche recentemente sorte negli Usa, che sostengono la necessità di uccidere gli scienziati per salvare il mondo. Naturalmente non si tratta di persone completamente prive di ragioni.

[8] La televisione, ad esempio, è oggi un potente mezzo di diffusione di concezioni magiche di ogni tipo (e anche in questo settore l'Italia è all'avanguardia). Se i libri saranno sostituiti da banche dati centralizzate e vulnerabili, la perdita della memoria collettiva potrebbe avvenire *in tempo reale*; i Cd-Rom costituiscono un supporto fisico di lunga durata, ma, a differenza dei libri, la loro leggibilità futura dipende dalla improbabile conservazione in forma immutata di una tecnologia sofisticata e fragile; si può dubitare che i futuri archeologi riusciranno a comprenderne la funzione.

Appendice

Dimostriamo qui i lemmi di Archimede usati nel §2.7. Archimede, nelle sue dimostrazioni, usa liberamente teoremi all'epoca ben noti. Poiché non ci è rimasto nessuno dei trattati sulle coniche precedenti quello di Apollonio, non è possibile ricostruire le dimostrazioni delle proposizioni presupposte da Archimede esattamente come Archimede stesso le avrebbe scritte. L'esposizione seguente è divisa in due parti: la prima, che contiene le proposizioni considerate da Archimede già note, è una ricostruzione libera, mentre la seconda, che contiene i lemmi effettivamente dimostrati da Archimede, segue da vicino la sua opera.

Preliminari presupposti da Archimede

Indicheremo con C il vertice del segmento di parabola di base AB e con M il punto medio di AB. Il nostro punto di partenza sarà la proposizione seguente:

Proposizione 1. Se da un punto generico F conduciamo la parallela ad AB e indichiamo con G l'eventuale intersezione di tale retta con la semiretta CM (con origine in C) , il punto F appartiene alla parabola se e solo se il punto intersezione G esiste e inoltre si ha che:

$$CM \cdot GF^2 = CG \cdot MB^2$$

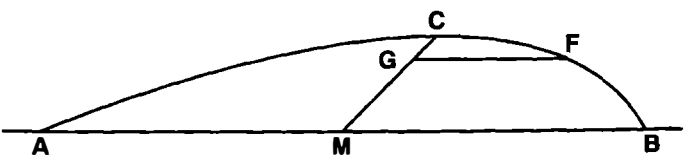


Fig. 1

Archimede in realtà richiama e usa solo una delle due implicazioni espresse nella proposizione 1. L'enunciato dato qui permette però di dedurre facilmente come corollari tutti gli altri risultati che Archimede richiama come già noti. Assumeremo la prop. 1 senza dimostrarla. Essa è una generalizzazione (facilmente dimostrabile con i metodi della moderna geometria analitica) della caratterizzazione della parabola come grafico della funzione $y=x^2$.

Corollario 1. La retta passante per C e parallela ad AB non interseca la parabola in punti distinti da C.

Infatti se tale retta intersecasse la parabola in un altro punto F, la prop. 1, essendo in questo caso C = G, implicherebbe F = G, e quindi anche F = C.

Corollario 2. La retta CM non interseca la parabola in punti distinti da C.

Infatti se la retta CM intersecasse la parabola in un altro punto F, la prop. 1, essendo in questo caso F = G, implicherebbe G = C e quindi anche F = C.

Corollario 3. Ogni retta parallela a CM interseca la parabola in uno ed in un solo punto.

Se la retta parallela a CM passante per il punto F della parabola la intersecasse anche nel punto F′, detto G′ il quarto vertice del parallelogramma GFF′G′, essendo GF = G′F′, per la prop. 1 avremmo CG = CG′ e quindi G′ = G e F′ = F.

Corollario 4. La retta CM è parallela al diametro della parabola (cioè al suo asse di simmetria).

Se applichiamo la prop. 1 al caso particolare in cui i punti A e B sono simmetrici rispetto al diametro, per motivi di simmetria CM coinciderà con il diametro della parabola. Il cor. 3 implica quindi che le rette parallele al diametro intersecano la parabola in un solo punto. Basta quindi dimostrare che quella del diametro è l'unica direzione con questa proprietà. Per questo, usando di nuovo la prop. 1 nel caso in cui CM coincide con il diametro e detto L un punto di AB non coincidente con M, basta osservare che la semiretta CL intersecherà la parabola, oltre che in C, nel punto F la cui proiezione ortogonale G sul diametro soddisfa la relazione:

$CG/CM = MB^2/ML^2$.

Corollario 5. La retta CN, che congiunge il vertice C del segmento di parabola di base AB con il punto N della base, è parallela al diametro della parabola se e solo se il punto N è il punto medio di AB.

Si tratta di una conseguenza immediata del cor. 4.

Lemmi dimostrati da Archimede

Lemma 1. Se C è il vertice del segmento di parabola di base AB, l'area del triangolo ABC è maggiore della metà dell'area del segmento di parabola.

Archimede dimostra questo lemma considerando il parallelogramma ABPQ compreso tra la base AB, la retta passante per C e parallela alla base e le rette passanti per A e per B parallele al diametro della parabola.

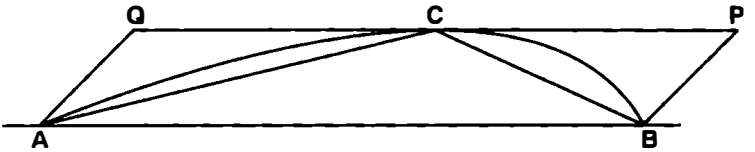


Fig. 2

Poiché la retta PQ, per il cor. 1, interseca la parabola solo in C, e poiché, per il cor. 3, le rette parallele al diametro possono intersecarla in un sol punto, il segmento di parabola di base AB risulta tutto contenuto nel parallelogramma ABPQ. Il lemma segue allora facilmente osservando che l'area del segmento di parabola è inferiore all'area (doppia di quella del triangolo ABC) del parallelogramma ABPQ.

Lemma 2. Se C è il vertice del segmento di parabola di base AB e D è il vertice del segmento di parabola di base CB, l'area del triangolo BDC è 1/8 di quella del triangolo ABC.

Il lemma 2 viene dimostrato da Archimede usando la prop. 1, il cor. 5 e i procedimenti tipici della "geometria elementare", cioè i metodi esposti negli *Elementi* di Euclide.

Consideriamo le rette parallele al diametro della parabola passanti per C e per D. Per il cor. 5, queste rette intersecano il

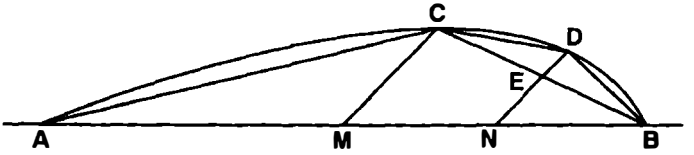


Fig. 3

segmento AB e il segmento BC nei loro punti medi, M ed E. Chiamiamo N l'intersezione del segmento AB con la retta ED. La similitudine dei triangoli MCB e NEB implica allora subito che N è il punto medio di MB.

Sia ora T l'intersezione della retta parallela ad AB passante per D con il segmento CM. Per la proposizione 1 si ha che:

$$CM/CT = MB^2/TD^2.$$

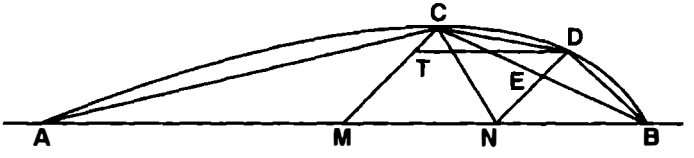


Fig. 4

D'altra parte il segmento TD è eguale al segmento MN (perché lati opposti di un parallelogramma) e quindi anche al segmento NB. Si ha quindi: $CM/CT = MB^2/NB^2 = 4$, e $DN = TM = (3/4)\ CM$. Poiché è $NE = 1/2\ CM$ (come segue dal confronto dei triangoli simili MCB e NEB) si ottiene $NE = 2\ DE$.

Se di due triangoli con la stessa altezza l'uno ha base doppia anche la sua area è doppia. Applicando questa banale osservazione all'ultima eguaglianza, si ricava:

area(CNE) = 2 area(CED); area(NEB) = 2 area(BED);

e sommando le due relazioni:

area(CNB) = 2 area(CBD);

area(CDB) = (1/2) area(CNB) = (1/8) area(ABC),

eguaglianza che completa la prova del lemma.

Elenco delle fonti

Aezio
Placita([DG])
328, 5: 279n(149, 150)
343a: 279n(149)
383a, 17-25: 278n(147), 311n(90), 312n(93, 94)
430: 172n(66)

Alessandro di Afrodisia
De mixtione
216,14 - 218,6: 176

Anassagora ([Diels])
fr.9: 39

Anassimandro ([Diels])
test. B11: 274n(131)

Anatolio
frammento([Heronis OO], IV)
160 - 162: 222n(1)

Antemio di Tralle
περὶ παραδόξων μηχανεμάτων: 286n(3)

Antipatro di Tessalonica
epigramma(*Anthologia graeca*, IX, 418): 140

Apollonio di Perga
Coniche: 114, 163n(29), 322-323
IV, praef.: 100n(83), 113
VII, praef.: 114n(128), 323n(122)

Apollonio Rodio
Argonautiche
II, 1002 sgg.: 199n(4)

Apuleio
Apologia
xvi: 84, 86

Archimede (ed. Mugler)
Arenario: 59, 163n(29), 329
135-136: 100, 101
137-140: 82
138: 159n(15)
145-157: 59-60
Quadratura della parabola: 67 71, 343-346
164, 3-12: 100n(83)
Sui conoidi e gli sferoidi 163n(29), 258n(89)
Sui galleggianti: 94-97, 126-127 178n(93)
I: 258n(90), 273, 275
I, 6: 95, 121n(16),
II: 95n(65), 96
II, 25: 92n(58)
Sulla sfera e sul cilindro
I: 236n(6)
I, 9, 2-11: 66
I, 9, 12-15: 100n(83)
I, 10, 23-25: 241
I, 11, 16-20: 70n(52)
Sull'equilibrio delle figure piane 91-94, 236n(6), 321
Sulle spirali: 122
5: 330n(135)
8, 12-20: 100n(83)
Sul metodo: 24, 94
84, 3-10: 66

Aristarco di Samo
Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna: 87, 100
ipotesi 2: 101n(91)
prop. 11: 101n(87)
Aristofane
Nuvole
840-850: 152n(138)
Aristotele
Analytica posteriora
I, 2, 71b, 26-28: 56
I,10, 76a, 40: 65
Analytica priora
I, 23, 41a, 26-27: 53n(12)
Atheniensium respublica
lxvii, 2-3: 121
Categoriae
10, 13a, 35-36: 203
De caelo
I, 3: 97n(70), 272n(126)
II,13, 295a, 13 sgg.: 39n(34)
II,14, 298a: 88
III,1, 300a: 243n(35)
IV: 97n(70), 272n(126)
De interpretatione: 162n(26)
De partibus animalium: 162
I: 170n(53)
II, 7, 652a 24 - 653a 36: 155
III, 6, 669a: 158n(11)
IV, 687a, 8-10: 172n(65)
Historia animalium:170
Metaphysica
V, 6, 1016b, 24-30: 72n(56), 243n(35)
VII, 5, 1031a, 13: 235n(2)
VIII, 1, 1042a, 17: 235n(2)
VIII, 3, 1043b, 23-32: 236
XI, 4: 71n(54)
XII, 7, 1072b, 30-1073a, 3: 172n(64)
XIII, XIV: 71n(54)
XIII, 6, 1080b, 16-21: 53n(13)
XIII, 6, 1083b, 8-18: 53n(13)
XIV,4, 1091a, 31-36: 172n(64)
XIV, 5, 1092a, 11-17: 172n(64)
Meteorologica
III, 3, 373a: 72n(57)
III, 4-5, 375b-377a: 72n(57)
Physica
II, 8, 198b, 16-31: 171-172
IV,1: 97n(70), 272n(126)
IV, 6-9, 213a-217b: 99n(80)
IV,11, 220a, 15 sgg.: 72n(56), 243n(35)
VI, 9, 239b-240a: 52n(11)
VII, 5, 250a: 42-44
Poetica
56b-57a: 216n(55)
Politica
III, 1280b: 204n(16)
VII, 1326a-b: 206
Topica
I,5, 101b, 36: 235n(2)
VI, 6, 143 b, 11: 243
VIII, 3, 158 b, 29: 66
pseudo-Aristotele
Problemi meccanici
848b, 14-30: 251
849a, 14-17: 251, 271- 272
Artemidoro di Daldi
Dell'interpretazione dei sogni: 207-212
Ateneo
Deipnosophistae
I, 13, b-c: 202n(6)
II, 42,a-b: 122
IV, 174, c: 220n(71)
IV, 174, b, d-e: 220n(71)
IV, 184, b-c: 28
V, 198: 146
V, 206-209: 126n(36)
V, 206: 127
V, 207,a: 127
V, 208, f: 132n(57)
XIII, 567, c-d: 123
XIV, 618, e - 620, a: 221n(75)
XIV, 654, b-c: 188n(43)
XV, 688, e - 689, b: 203n(8)
XV, 691, f: 203n(8)
XV, 692, b: 150n(129)

Bacone (Ruggero)
Epistola de secretis operibus: 151
Opus Majus: 85-86n(35), 153
Specula mathematica in qua de specierum multiplicatione, ...
III, ii: 326n(131)
Bitone
Costruzione di macchine belliche e catapulte: 137, 183

Bolo Democrito
Physica et Mystica: 176
Boulliau I.
Astronomia philolaica (Paris, 1645): 326n(130)
Boyle R.
The sceptical Chymist(London, 1661)
cap.1, prop.2: 178n(93)

Callimaco
epigramma(*Anthologia graeca*, VII, 89): 280n(155)
La chioma di Berenice
1-7: 100n(83)
Cavalieri Bonaventura
Lo specchio ustorio... (Bologna,1632): 305, 322
125-128: 129-130n(49)
Celio Aureliano
Celeres vel acutae passiones
I, praef., 4-5: 156n(8), 169
III, 12, 108: 168
Celso
De medicina
proemio, 23, 6: 162, 162n(24)
Cesalpino (Andrea)
Quaestiones peripateticae(Venetiis, 1571)
III, *Quaestio*V: 312n(91)
pseudo-Cesare
De bello alexandrino
5: 205n(20)
Cicerone
Epistulae
Ad Q. fr, III, 5,6: 226
De finibus
I, 6,17: 251n(59)
De divinatione
I, 64: 210
De natura deorum
II, xxxiv, 88: 104
De re publica
I, xiv, 22: 104
Pro Rabirio Postumo
39-40: 197
Topica
iii: 225
Tusculanae disputationes
I, xxv, 63: 104n(98)
Clemente Alessandrino
Stromata
V, 58: 234n(44)
Cleomede
Caelestia(ed. Todd)
I, 7, 48-110: 88n(47)
I, 7, 49-52: 246
I, 7, 101-102: 247
II, 6,174-177: 85n(32)
Copernico N.
De revolutionibus orbium caelestium:234n(45), 294
I, 9: 294n(33)
Crisippo ([SVF])
fr. II 147, 148: 216n(57)
fr. III 138: 196
Crisogono (Federico)
Tractatus de occulta causa fluxus et refluxus maris(Venezia, 1528): 313n(100)

Darwin C.
The origin of species by means of natural selection(London, 1861[3]): 172n(60)
Darwin G.H.
The tides(London, 1898)
76: 277n(140), 313n(99)
de Dominis M. A.
De radiis visus et lucis...(Venezia, 1611): 298n(47)
Euripus, seu de fluxu et refluxu maris..., (Roma, 1624): 312-313
5-7: 312-313
Della Porta G.B.
Tre libri de' spiritali(Napoli, 1606): 143
Magia naturalis(Napoli, 1589[2]): 299
Democrito (Diels])
fr. 26: 162-163n(27)
fr. 125: 38
Descartes R. ([Descartes AT])
Dioptrique: 300
Le Monde...
cap. 7, 41-47: 310

cap. 12: 278n(145)
Géométrie: 309, 310n(85)
Les Météores: 298
Dicearco (ed. Wehrli)
fr. 110: 89n(50)
Diocle
Sugli specchi ustori([Diocle, Toomer]): 83n(21)
34: 84n(23, 25)
Diodoro Siculo
Bibliotheca historica
I, vii, 1-2: 273n(127)
I, vii, 2: 258n(90)
I, xxxiv, 2: 132n(56)
V, xix-xx: 125n(32)
V, xxxvi-xxxvii: 191n(58)
V, xxxvii, 3-4: 132n(56)
XVII, lii, 5: 196n(81)
XVII, lii, 6: 190n(52)
XX: 23n(5)
XX, lxxxii-c: 134n(65)
Diogene Laerzio
Vite dei filosofi
I, 23: 124n(27)
VII, 79-81: 213n(46)
VII, 94-102: 217n(61)
VII, 145: 274n(129)
VII, 152: 86n(39)
VII, 158: 221n(73)
VIII, 28: 174n(71)
VIII, 42: 234n(44)
VIII, 83: 94n(63)
IX, 31: 38n(32)
IX, 89: 102n(94)
IX, 99: 253n(68)
X, 74: 274n(129)
X, 87: 102n(94)
Dione di Prusa
Orazioni
32, 36: 196
32, 40: 205
Dionigi Periegete
Descrizione della Terra
6-7: 257, 257n(86)
Dionisio Trace
Ars grammatica: 216
Dioscoride
De materia medica: 174, 193
Empedocle (ed. Gallavotti)
Poema fisico
fr. 4: 177
fr. 6-7: 172-173
fr. 96: 97
Epicuro
Massime capitali
XXXIII: 204n(16)
XXXVI-XXXVIII: 204n(16)
Epitteto
Manuale
xlix: 259n(94)
Erodoto
Le Storie
II, 109: 87
Erone
Belopoiika: 135n(71), 137n(86), 145
Cheiroballistra: 137n(86)
Definizioni([Heronis OO], vol. IV)
proemio, 14: 243
deff. 1, 2, 4, 7, 8: 239-241
106: 80n(4)
De speculis
4: 84, 334
Dioptra: 119-120, 144n(107), 146-147, 261
Meccanica: 119-120, 321
I, iv, 20-21: 251, 304
I, viii: 251
II, i, 5: 118
II, iii, 21-28: 289n(18)
III, ii, 13-20: 194
III, ii, 19-21: 161
III, ii, 21: 118
Pneumatica([Heronis OO], vol.I): 97-98, 144-146
I, proemio, 6, 6-7: 157n(10)
I, proemio, 24, 20 sgg.: 98
I, ii, 36, 8-18: 99n(80)
I, xxi: 144
I, xxviii: 132n(59)
I, xxxviii: 143
I, xlviii: 141
II, xi: 143
Sugli orologi ad acqua(fr. in [Heronis OO], vol.I, p. 456): 122n(19)
Sulla costruzione di automi: 144, 146

Euclide
Elementi: 23, 56, 214, 334
I, definizioni: 56, 56n(21), 235-244
I, postulati: 56, 72-73,
I, prop. 1: 74
I, prop. 4: 238n(14)
I, prop.16: 336n(156)
I, prop. 25: 241n(29)
I, prop. 35: 214n(50)
I, prop. 46: 74
III, prop. 12: 241n(28)
V: 53
V, def. 4: 70
V, def. 5: 63-64, 73, 302
VII, def. 1: 237
IX, prop. 20: 61-62
XII, prop. 2: 74
Ottica: 79-83
def. 1: 159n(16)
def. 7: 159n(16)
prop. 1: 159n(16)
prop. 51: 106, 166n(40)

pseudo-Euclide
Catottrica: 79n(1)

Eustazio
In Homeri Iliadem
VI, 446: 257

Eutocio
Comm. a 'Sulla sfera e sul cilindro' di Archimede([Mugler: Archimède], IV),
62, 1-4: 286n(2)
62-64: 94-95n(63)
64-69: 138n(89)
88-89: 285n(1)

Falloppio
Observationes Anatomicae(Venetiis, 1561): 295

Filone di Bisanzio
Belopoiika([Marsden TT]): 145n(118), 255n(75)
106-108: 137-138
108: 255n(76)
123: 136n(81)
144-152: 135
152, 12: 97n(72)
152-154: 135
Paraskeuastica: 137
Pneumatica, ([Prager: Filone]): 97-99, 132-133n (60), 186n(29)
iii, 129: 99
iii, 129-130: 305n(69)
v, 84: 131n(54)
vii, 134-135: 305n(72)
viii, 136: 98
lxiv, 228-230: 132n(59)
Poliorcetica: 137

Filopono (Giovanni)
Comm. in Arist. phys.([CAG], vol. XVII)
642: 303n(62)
683: 303n(60)

Filostrato
Vita di Apollonio di Tiana
II, xxii: 204n(14)

Flavio Giuseppe
Bellum judaicum
II, 16, 383: 232
II, 16, 385: 190
IV, 10, 613: 128

Fozio
Bibliotheca, epitome del romanzo *Le meraviglie di là da Tule*di Antonio Diogene: 124

Fracastoro G.
Homocentrica sive de stellis(Venetiis, 1538)
II, viii: 297n(43)
III, xxiii: 297n(43)

Francesco di Giorgio Martini
Trattato di architettura, ingegneria e arte militare: 291

Frege G.
Begriffsschrift(Halle, 1879): 215

Freud S.
Die Traumdeutung(Leipzig/Wien, 1899)
cap. 2 : 211
cap. 3: 211
Vorlesungen zur Einführung in die Psychoanalyse(1917)
lezione quinta: 211

Frontino
De aquis
I, 25-63: 230n(37)

Galeno
De anatomicis administrationibus
9.9: 155n(5)
De causis procatarcticis
XIII, 162: 165
XVI, 197-204: 165-166
De experientia medica,
13.6: 164
De foetuum formatione
5: 164-165
De praesagitione ex pulsibus
II, 3: 165
De temperamentis
III, 2: 83
De usu partium
IX, 6: 160n(19)
In Hippocratis prognosticum
I, comment. I.4: 166
pseudo-Galeno
De historia philosopha
103: 157
106: 210
Galilei Galileo
De motu(ediz. naz., vol. 1): 302, 303
299: 303-304
321: 302n(59)
Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo
IV giornata: 312
Discorsi e dim. matem....(ediz. naz.,vol. 8): 300-304
I giorn., 64-65: 305
I giorn., 86: 305
II giorn.: 307n(76)
III giorn., 213: 306
III giorn., 266-267: 301
giornata aggiunta *Sopra le definizioni delle proporzioni d'Euclide*, 353: 302
La bilancetta: 302
Meccaniche(ediz. naz., vol. 19)
209: 304n(66)
Galilei Vincenzo
Dialogo della musica antica e della moderna(Firenze, 1582): 301n(54)
Gemino
Introduzione ai fenomeni
i, 23: 279
Giamblico
In Nicomachi arithmeticam introductionem
11, 5: 237
17-19: 59n(28)
121: 39n(36)
De communi mathematica scientia
28, 22-35: 223n(7)
Vita pitagorica
75-78: 234n(43)
115-119: 39n(36)
pseudo-Giamblico
Theologoumena arithmeticae: 234n(42)
Gilbert G.
De magnete...(Londini, 1600): 331n(140)

Halley E.
Apollonii Pergaei conicorum libri VIII(Oxford, 1710): 323
Hilbert D.
Grundlagen der Geometrie(Leipzig/Berlin, 1930[7]): 337
Hooke R.
lettera a Newton del 6.1.1680: 325n(128)

Ibn Al Haytham (Alhazen)
Libro di ottica(*Kitāb al-Manāzir*)
VII: 287n(7)
Ibn Sīnā (Avicenna)
Trattato sulla saggezza
(*resâ 'il fî 'l-hikmet*)
76: 288
Ibn Sahl
Libro sugli strumenti ustori(*Kitāb al-ḥarrāqāt*): *288n(8), 300n(52)*
Igino
Fabulae
fabula 274: 168
Ipparco
*Comm. ai 'Fenomeni' di Arato e di Eudosso:*100, 260n(101)

Kepler J.
De fundamentis astrologiae([Kepler OO]), vol. I)
422: 307
Epitome astronomiae copernicanae([Kepler OO]), vol. VI) 310 sgg.: 308
334: 308
344: 309n(81), 326n(132)

Lambert J.H.
Die Theorie der Parallellinien (Leipzig, 1786): 335

Leonardo da Vinci
Codice Ash. II
12 b: 296n(40)
Codice Atlantico
133 (verso): 137n(84)
Codice Brit. Mus.
279 b: 296n(41)
Codice Leicester:292
Codice Madrid I
5, 10: 137n(84)
Codice parigino E
15b: 296n(42)
Codice parigino L
2a: 296

Leucippo ([Diels])
fr.2: 38

Livio
Ab urbe condita libri
XXI, xxxvii, 2: 178

Lobačevskij N.J.
Nuovi principi della geometria...: 336

Luciano
Erodoto, o Aezione: 81
Vita di Demonatte: 177
Una storia vera: 124

Lucrezio
De rerum natura
I, 136-139: 230n(33)
II, 112-141: 38n(32), 99n(82)
II, 225-239: 303n(63)
II, 294-296: 177
II, 799-800: 86
IV, 387-390: 107n(109), 265n(110)
IV, 426-431: 80
IV, 823-842: 173
V, 828-833: 173
V, 855-859: 173
V, 916-924: 173
V, 925-928: 174
V, 1028 -1032: 174

Macrobio
comm. al Somnium Scipionis di Cicerone: 283

Manilio
Astronomica
I, 867-875: 281

Marcellino
De pulsibus
11: 156

Marziano Capella
De nuptiis Mercurii et Philologiae
VI, 598: 249

Menelao
Sphaerica: 78, 335-336
I, prop. xi: 336n(157)

More Thomas
Utopia(Louvain, 1516)
II: 188n(40)

Newton I.
De mundi systemate liber (London, 1728)
1: 320, 324
Opticks(N.York,1959)
169: 298
176-177: 298
Philosophiae Naturalis Principia Mathematica(London, 1687): 314-317
Definizioni I-V: 316
comm. alla def. 5: 318
Definizioni. Scolio: 314-316
I, sez. 1: 330
III, ipotesi I: 315n(104)
Scolii classici([Newton *Scolii classici*]): 319n(113)
41-42: 325
46: 320
Trattato sull'Apocalisse(Torino, 1994): 324n(124)

Nicomaco di Gerasa
Manuale di armonia
6: 39n(36)

Orazio
Ars Poetica
60 sgg.: 215n(54)

Oribasio
Collectiones medicae
24.1, 7-8: 160n(19)

Pappo
Collezione(ed. Hultsch): 29, 233
II, 6-28: 59n(27)
V, 304-306: 189
VII, 636, 24-25: 248n(51)
VII, 662, 15-18: 248n(51)
VIII, 1026, 2-4: 104
VIII, 1026, 9-12: 116n(136)
VIII, 1068, 20: 93
commento all' Almagesto: 233

Peregrino (Pietro)
Epistola... de magnete:
331n(140)

Piero della Francesca
De prospectiva pingendi:
82n(14)

Platone
Cratilo: 162n(25)
Menone
82b-85e: 54
Parmenide
137e, 3-4: 79n(2)
Repubblica
VI, 509c-511a: 54
X, 602c-603a: 81
Simposio
175d, 6-7: 95n(65)
Timeo
62c - 63e: 272n(126)
81b-c: 54

Plinio
Naturalis historia: 24
II, 67: 266n(115)
II, 69: 267
II, 70: 266n(116)
II, 71: 266n(115)
II, 77: 283
II, 91: 280
II, 95: 146n(123), 266, 279n(150)
II, 183: 248
II, 212: 277
II, 213: 277
II, 216: 277
II, 247-248: 88, 227
X, 154: 188n(40)
XI, 19: 189
XI, 29: 227
XI, 149: 227
XII, 53: 245n(39)
XVIII, 296: 187
XVIII, 317: 161
XXX, 4: 184n(23)
XXX, 12: 225n(14)
XXXIII, 97: 191
XXXV: 168n(45)
XXXV, 24: 225n(13)
XXXV, 30: 175
XXXV, 49-50: 175
XXXV, 80: 81
XXXV, 92: 81
XXXV, 112: 219n(66)
XXXV, 114: 219n(66)
XXXV, 138: 219n(66)
XXXV, 143: 219n(66)
XXXVII, 28-29: 152
XXXVII, 64: 152n(145)

Plutarco
De defectu oraculorum
425C-D: 275n(133)
434A-B: 194n(68)
De facie quae in orbe lunae apparet: 309, 318-319
921 A: 86n(40)
921 D: 101n(87), 254
921 D-E: 86n(37)
923 A: 101, 105n(101)
923 C-D: 252, 318
923 E-F: 318
923 F-924C: 252-253, 310, 318-319
924 D-F: 274
925 E-926B: 256
De fraterno amore
486B: 172n(63)
De Iside et Osiride
358F-359A: 86n(40)
De Pythiae oraculis
408F: 242n(32)
De sollertia animalium

96A-B: 189n(45)
Platonicae quaestiones
1003E: 242n(32)
1006A-B: 221n(73)
1006 C: 278, 311
1009B-1011E: 216n(57)
Quaestionum convivalium libri vi
625E-626E: 86n(37)
663C: 168n(48)
677E: 99n(81)
691C- 692A: 99n(81)
Quaestionum convivalium libri iii
718 F: 95n(63)
722A-B: 99-100n(82)
Vita di Marcello
xiv, 7: 93
xiv, 8: 44n(42)
xv, 1-3: 133
xvii, 3-4: 116n(135)
Vita di Sertorio
viii: 125n(32)

pseudo-Plutarco
De placitis philosophorum
901B: 86n(37)

Polibio
Storie
VIII, 7-8-9: 133
XII, 25 d: 165
XII, 13, 11: 151
XXI, 28, 15: 192
XXXI, 20: 28n(17)
XXXIV, 14: 28

Porfirio
In Ptolemaei Harmonica(ed. Düring)
119, 13 - 120, 7: 39n(36)

Proclo
In primum Euclidis elementorum librum commentarii(ed. Friedlein): 243
63: 44
100: 72
105, 1-6: 118-119
109-110: 242
157, 10: 51n(7)
299, 1: 51n(7)
346-347: 241n(29)
352, 14sgg.: 51-52
362,12-363,18: 334n(151)
365, 5-367, 27: 334n(151)
371, 23-373, 2: 334n(151)
395, 13-18: 214n(50)

Redi Francesco
Esperienze sulla generazione degl'insetti(in [Scienziati del '600])
584: 174n(71)

Rufo Efesio
De nominatione partium hominum: 169
139, 8 sgg.: 169
151, 1 sgg.: 169
Synopsis de pulsibus
4: 158

Seneca
Epistulae ad Lucilium
90: 228-229
Naturales quaestiones: 228
I, v, 1: 228
I, vi, 5: 85n(32)
I, vii, 1: 86n(42)
I, xvi-xvii: 228
II, xxxi, 1: 228
II, liii, 1: 228
VII, ii, 3: 265
VII, iv, 1: 280
VII, xvii, 1-2: 280, 281n(157)
VII, xxv, 5: 262
VII, xxv, 6-7: 263

Sesto Empirico
Adversus Dogmaticos
I, 244: 80n(3)
I, 283: 53n(13)
II, 11-12: 217n(62)
II, 70: 217n(62)
II, 113: 212n(45)
II, 224 -227: 213n(46)
III, 54: 204n(17)
IV, 43-44: 178n(93)
IV, 174: 107n(111)
IV, 318: 178n(92)
Adversus Mathematicos: 222
I, 9: 223
I, 19-20: 223
I, 28: 223, 253n(68)
I, 82: 215n(54)
I, 133: 223n(2)
III, 1 sgg.: 102n(93)

III, 20: 239
III, 94: 240
III, 98: 240
III, 107: 238, 239
III, 110-111: 53n(13)
V, 69: 221n(73)
V, 82: 85n(32)
Lineamenti del Pirronismo
I, 13: 166n(38)
I, 107: 107n(110)
II, 110: 212n(45)
II, 157-158: 213n(46)
II, 207-208: 240
Simplicio
In Arist. categ.([CAG], vol.VIII)
401, 7 sgg.: 203n(10)
In Arist. de cael.([CAG], vol.VII)
264-266: 302
264, 25-26: 255-256
265, 3-4: 256
265, 9-11: 256
267,30 - 268,4: 97n(69)
294, 33: 38n(33)
444: 101
541: 105n(102)
569, 5-9: 97n(69)
In Arist. phys.([CAG], vol. X)
23, 29: 124n(27)
916, 12-27: 252
Stobeo
Eclogae
I, xiv, 1h: 97n(69)
II, xxxi,114, 2-6: 112
Strabone
Geografia
I, i, 8: 126n(37), 276n(136)
I, i, 9: 276n(136), 278
I, i, 12: 90n(51), 146-147, 248n(53)
I, i, 20: 258n(87)
I, iii, 4: 172, 273n(127)
I, iii, 11: 275
I, iv, 1: 261n(103)
I, iv, 2-3: 125n(31)
II, iii, 4: 124n(30)
II, iii, 6: 172, 273n(127)
II, iv, 1: 125n(31)
II, v, 5: 258
II, v, 7: 90n(53)
II, v, 24: 245
III, v, 9: 276, 276n(136), 284n(172)
IV, i, 5: 125, 195
IV, i, 8: 195
IX, i, 23: 192n(62)
XII, iii, 30: 140n(93), 184n(21)
XIV, ii, 5: 125, 127n(41)
XIV, v, 3: 143n(103)
XIV, v, 5: 143n(103)
XVI, i, 6: 276n(136), 277n(144)
XVII, i, 2: 249
XVII, i, 8: 182
XVII, i, 6-10: 205n(21)
XVII, i, 30: 184
Svetonio
Vita di Vespasiano
18: 199n(91)

Taccola M.
De ingeniis: 291n(23)
Teodosio
Sphaerica: 78
Teofrasto
De igne
fr. 73: 152
Historia plantarum
II, iii: 170
De causis plantarum
II, 13.3: 170
III, 11.1 - 16.4: 187
IV, 4.11: 170
De odoribus:203n(8)
Metaphysica
10a, 22 - 11b, 26: 171
Teone di Alessandria
Commento all'Almagesto
comm. in I, iii: 84
comm. in III: 237n(12)
Teone di Smirne
De utilitate mathematicae...
187, 14-18: 283
188, 2-7: 283
Tolomeo
Almagesto(ed. Heiberg): 78, 100, 109-111, 259-262, 281-282, 323
I, iii, 11: 282
I, iii, 13: 260n(102)

I, iv, 14-16: 282
I, vii, 24:107, 282
III, i, 192: 279
III, i, 195: 100n(84)
III, i, 206: 27n(11)
III, i, 207: 261n(107)
V, v, 369: 146n(123), 255n(73)
V, xiii, 416: 101n(87)
V, xiv, 417: 146n(123)
VII, ii, 15: 280n(153)
IX, ii, 210: 261, 282, 283
IX, ii, 211: 280n(154)
XII, i, 452-455: 259n(96)
Ottica([Govi: Tolomeo]): 85-86, 287-288, 299-300, 323, 331
II, 40-41: 86n(36)
III, 77-78: 260n(102)
V, 144-150: 85
V, 30, 151 sgg.: 85
Geografia: 90-91, 123-124, 261
I, xi: 91n(54)
Ipotesi planetarie: 260
Tetrabiblos: 260
I, 5-6: 260n(99)

Valerio Massimo
Fact. et dict. mem. libri IX
IX, ii, ext. 5: 28n(15)

Varrone
De re rustica
I, i, 8 sgg.: 185, 189
I, v,1-2: 226
III, ii, 13 sgg.: 188n(38)

Villard de Honnecourt
taccuino di appunti: 289

Vitruvio
De architectura
I, i: 230
I, ii, 2: 80
V, iv, 1: (229-230)n(33)
V, v: 221n(74)
V, v, 8: 225n(13)
VII, praef.: 137n(82)
VII, praef.,11: 80
VII, xi-xiv: 175
VIII, v, 2-3: 87, 229
VIII, vi, 5-9: 130
IX, praef., 9-12: 230
IX, i, 6: 267
IX, i, 11-13: 266n(117), 267, 267n(119), 327
IX, vi, 3: 266n(114)
IX, vii, 2: 268
IX, vii, 3: 268-269
IX, vii, 6: 268
IX, viii, 2-14: 121
IX, viii, 4-5: 146
X, iv-v: 141n(97)
X, v: 140
X, vii, 1-3: 132
X, vii, 3: 293
X, vii, 4: 97n(73)
X, viii: 220n(70)
X, xiii, 5: 134n(67)
X, xvi, 3: 134n(68)
X, xvi, 5: 307n(76)

Viviani V.
lettera a Leopoldo de' Medici del 20/8/1659(in Ediz. Naz. delle Opere di G.Galilei, XIX, 647-659): 306n(75)

Voltaire
Lettres philosophiques(1734)
xv: 333n(148)

Wallis J.
Tractatus de sectionibus conicis (London, 1655): 322
An Essay of Dr. John Wallis, exhibiting his Hypothesis about the Flux and Reflux of the Sea (Phil. Trans., N.16, August 1666)
263-289: 322n(117)

Zosimo di Panopoli
Memorie autentiche (ed. Mertens)
IV, 1, 30-34: 174n(75)
VII, 2, 8-10: 174n(75)
X, 7, 135-137: 174n(75)

Opere anonime

Corpus Hermeticum
XVI *(Asclepius)*,5, 7: 325n(126)
De rebus bellicis: 135, 151
Fragmentum mathematicum Bobiense

113, 28-33: 84n(22)
Laterculi Alexandrini: 117-118
lettera di Adriano: 200
prefazione all'Ottica di Euclide ([Euclidis OO], vol. VII)
150: 83
romanzo di Nino: 219n(65)
Scolio al V libro degli *Elementi* di Euclide ([Euclidis OO], vol. V)
280: 66
Scolio alla *Catottrica* attribuita ad Euclide ([Euclidis OO], vol. VII)
348: 85n(30)
Scolio al *Fedone* di Platone ([Diels], s.v. 'Filolao', test. 1a): 234n(44)
Suda
voce *Pappo*: 210n(37)

Papiri

P. Anastasi I: 50n(5)
P. Cairo Zen. 59021: 180
P. Cairo Zen. 59028: 200n(96)
P. Cairo Zen. 59075: 188
P. Cairo Zen. 59155: 180
P. Cairo Zen. 59782a: 193n(64)
P. Col. Zen. 4: 194
P. Cor. 5: 131
P. Edfu 8: 186
P. Hal. I, 84 sgg.: 205
P. Hercul. 1061: 238
P. Holmiensis: 176-177
P. Leyd. X: 176-177
14-ma ricetta: 177-178
P. Londinensis, 137: 164
P. Mich., iii, 143: 238, 242n(33)
P. Oxy. 275: 180n(8)
P. Oxy. 725: 180n(8)
P. Oxy. 1668: 181n(8)
P. Oxy. 1241, II, 16: 91n(56)
P. Petr. iii: 186
P. Rev. Laws 38-56: 181n(9)
P. Teb. 890: 182n(12)

Iscrizioni

[Clara Rhodos], VIII, 228 sgg.: 127
[OGIS], 104: 182n(14)
[OGIS], 135: 28n(18)

Abbreviazioni bibliografiche

Quando di un'opera è indicata sia un'edizione in lingua originale che una traduzione italiana i numeri di pagina riportati nel testo si riferiscono a quest'ultima.

[Barthes]: R. Barthes, *Eléments de sémiologie*, Paris 1964 (trad. it.: *Elementi di semiologia*, Torino 1966).

[Benevolo]: L. Benevolo, *Una introduzione all'architettura*, Roma/Bari 1962.

[Bianchi Bandinelli]: R. Bianchi Bandinelli, *La pittura* (in [SCG], vol. 10).

[Bieżuńska-Małowist]: I. Bieżuńska-Małowist, *La schiavitù nell'Egitto greco-romano*, Roma 1984.

[Bloch MA]: M. Bloch, *Avènement et conquetes du moulin à eau*, "Ann. d'hist. econ. et soc.", VII, 1935.

[Bloch SF]: – *La société féodale*, Paris 1939 (trad. it.: *La società feudale*, Torino 1965[6]).

[Bocheński]: I.M. Bocheński, *Ancient formal logic*, Amsterdam 1951.

[Bohr]: N. Bohr, *The Unity of Human Knowledge*, New York 1966.

[Bonelli Russo]: F. Bonelli, L. Russo, *The origin of modern astronomical theories of tides: Chrisogono, de Dominis and their sources*, "The British Journal for the History of Science" (di prossima pubblicazione).

[Bonnin]: J. Bonnin, *L'eau dans l'antiquité. L'Hydraulique avant notre ère*, Paris 1984.

[Born]: M. Born, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate*, New York 1978 (trad. it.: *Max Born. Autobiografia di un fisico*, Roma 1980).

[Bowman]: A.K. Bowman, *Egypt after the Pharaohs*, London 1986 (trad. it.: *L'Egitto dopo i faraoni*, Firenze 1988).

[Boyer]: C. Boyer, *A History of Mathematics*, New York/London/Sidney 1968 (trad. it.: *Storia della matematica*, Milano 1976).

[Bozzi]: P. Bozzi, *Fisica ingenua*, Milano 1990.

[Braudel]: F. Braudel, *Civilisation matérielle et capitalisme (XVe-XVIIIe siècle)*, Paris 1967 (trad. it.: *Capitalismo e civiltà materiale (secoli XV-XVIII)*, Torino 1977[2]).

[Bresciani]: E. Bresciani (a cura di), *Letteratura e poesia nell'antico Egitto*, Torino 1990.
[de Broglie]: L. de Broglie, *Sur les sentiers de la science*, Paris 1960 (trad. it.: *Sui sentieri della scienza*, Torino 1962).
[Bromehead]: C.N. Bromehead, *La tecnica delle miniere e delle cave fino al XVII secolo* (in [HT], vol. 2).
[Brown 1]: R. Brown, "Phil. Mag.", 4, 1828.
[Brown 2]: R. Brown, "Ann. d. Phys. u. Chem.", 14, 1828.
[CAG]:*Commentaria in Aristotelem Graeca*, Berlin, 1882-1909.
[CAH]: *The Cambridge Ancient History*, Cambridge 1969 (trad. it. (parziale): *Storia del mondo antico*, Milano 1988).
[Canfora]: L. Canfora, *La biblioteca scomparsa*, Palermo 1986.
[Carra de Vaux: Erone, Mecc.]: *Les Mécaniques ... de Héron d'Alexandrie, publiée ... sur la version arabe de Qostà Ibn Lûqà et traduites en français par M. Le baron Carra de Vaux*, extrait du "Journal Asiatique", Paris 1894.
[Carra de Vaux: Filone, Pneum.]: *Le livre des appareils pneumatiques ... par Philon de Byzance ... traduit en français par Le baron Carra de Vaux*, Paris 1902.
[Casson]: L. Casson, *The ancient mariners. Seafarers and Sea Fighters of the Mediterranean in Ancient Times*, Princeton 1991.
[Cavallo]: G. Cavallo et al., *Le biblioteche nel mondo antico e medievale*, Roma/Bari 1988.
[Cherniss]: H. Cherniss, *Plutarch's Moralia*, vol. XII, with an English Translation by H. Cherniss and W.C. Helmbold, Loeb Classical Library, London/Cambridge (Mass.) 1957.
[Childe]: V.G. Childe, *Moto rotatorio* (in [HT], vol.1).
[Clagett]: M. Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison, Wisconsin 1959 (trad. it.: *La scienza della meccanica nel Medioevo*, Milano 1972).
[Clara Rhodos]: *Clara Rhodos*, Ist. storico archeologico, Rodi 1932-1941.
[Clayton Price]: P.A. Clayton, M.J. Price, *The Seven Wonders of the Ancient World*, London 1988 (trad. it.: *Le Sette Meraviglie del Mondo*, Torino 1989).
[CMH]: *The Cambridge Medieval History*, Cambridge 1966 (trad. it. parziale: *Storia del mondo medievale*, Milano 1978).
[Cohen Drabkin]: M.R. Cohen, I.E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science*, New York 1948.
[Crombie]: A.C. Crombie, *From Augustine to Galileo*, 2 voll., Cambridge 1959 (trad. it.: *Da S.Agostino a Galileo*, Milano 1970).
[Darwin G.]: G.H. Darwin, *The Tides (and kindred phenomena in the solar system)*, London 1898.
[De Mauro]: T. De Mauro, *Introduzione alla semantica*, Roma/Bari 1971.
[Descartes AT]: *Oeuvres de Descartes*, publiées par C. Adam & P. Tannery, 12 voll., Paris 1897-1911.
[DG]: H. Diels, *Doxographi graeci*, Berlin 1879.
[Diels]: H. Diels ed., *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Berlin 1903. VI ediz., Kranz Walther ed., Berlin 1951-1952, 3 voll.; rist. Dublin/Zurich 1969-1971.

[Diels Stratone]: H. Diels, *Über das physikalische System des Straton*, "Sitzungsberichte der Kgl. Preussischen Akademie der Wissenschaften", 1893.
[Dijksterhuis Archimede]: E.J. Dijksterhuis, *Archimedes*, New York 1957 (trad. it.: *Archimede*, Firenze 1989).
[Dijksterhuis MIM]: – *The mechanization of the world picture*, Oxford 1961 (trad. it.: *Il meccanicismo e l'immagine del mondo*, Milano 1971).
[Drachmann KPH]: A.G. Drachmann, *Ktesibios, Philon and Heron*, "Acta historica scientiarum", IV, Copenaghen 1945.
[Drachmann MTGRA]: – *The Mechanical Technology of Greek and Roman Antiquity*, Copenaghen 1963.
[Drake Galileo]: S. Drake, *Galileo at Work. His Scientific Biography*, Chicago 1978 (trad. it.: *Galileo. Una biografia scientifica*, Bologna 1988).
[Drake HGG]: – *Hipparchus-Geminus-Galileo*, "Stud. Hist. Phil. Sci.", vol. 20, pp. 47-56, 1989.
[Dreyer]: J.L.E. Dreyer, *History of the planetary system from Thales to Kepler*, Cambridge 1906 (trad. it.: *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero*, Milano 1970).
[Drower]: M.S. Drower, *Fornitura di acqua, irrigazione e agricoltura* (in [HT], vol.1).
[Droysen]: J.G. Droysen, *Geschichte des Hellenismus*, Gotha 1878.
[DSB]: *Dictionary of Scientific Biography*, ed. C. Gillispie, New York 1970-1980.
[Duhem OS]: P. Duhem, *Les Origines de la Statique*, Paris 1905-1906, 2 voll.
[Duhem TP]: – *La théorie physique*, Paris 1906; rist. Paris 1993.
[Dutka]: J. Dutka, *Eratosthenes' Measurement of the Earth Reconsidered*, "Archive for History of Exact Sciences", 46, 1, 55-66, 1993.
[Edelstein]: L. Edelstein, *The idea of Progress in Classical Antiquity*, Baltimore 1967.
[Einstein]: A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, "Ann. d. Phys.", 17, 1905.
[Enriques de Santillana]: F. Enriques, G. de Santillana, *Storia del pensiero scientifico. Il mondo antico*, Bologna 1932.
[Ensslin]: W. Ensslin, *Il governo e l'amministrazione dell'impero bizantino* (in [CMH], vol. III).
[Euclidis OO]: *Euclidis Opera Omnia* (eds. I.L. Heiberg, H. Menge), Leipzig 1883-1916.
[Fedeli]: P. Fedeli, *Biblioteche private e pubbliche a Roma e nel mondo romano* (in [Cavallo]).
[Feldhaus]: F.M. Feldhaus, *Die Technik der Antike und des Mittelalters*, Potsdam 1931.
[Forbes AB]: R.J. Forbes, *Alimenti e bevande* (in [HT], vol. 2).
[Forbes EIIS]: - *Energia idraulica e impianti sanitari* (in [HT], vol. 2).
[Forbes EM]: - *Energia motrice* (in [HT], vol. 2).
[Forbes metall.]: – *Metallurgia* (in [HT], vol. 2).
[Franchi]: S. Franchi, *La musica* (in [SCG], vol. 6).
[Fraser]: P. M. Fraser, *Ptolemaic Alexandria*, Oxford 1972, 3 voll.
[Frege]: G. Frege, *Begriffsschrift*, Halle 1879.

[Friedlein: Proclo]: *Procli Diadochi in primum Euclidis Elementorum librum commentarii*, ed. G. Friedlein, Leipzig 1873.
[Galileo Discorsi]: Galileo Galilei, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze*, in *Edizione nazionale delle Opere di Galileo Galilei*, Firenze 1890-1909, vol. 8.
[Gallavotti G.]: G. Gallavotti, *I moti quasi periodici da Ipparco a Kolmogorov* (inedito).
[Garofalo: Erasistrato]: *Erasistrati fragmenta collegit et digessit*, I. Garofalo, Pisa 1988.
[Gentili]: B. Gentili, *Poesia e pubblico nella Grecia antica*, Roma/Bari 1984.
[Gentili Pretagostini]: B. Gentili, R. Pretagostini (a cura di), *La musica in Grecia*, Roma/Bari 1988.
[Geymonat]: L. Geymonat, *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, 7 voll., Milano 1973^2.
[GGM]: *Geographi Graeci Minores*, ed. Carolus Müllerus, Paris 1851.
[Gibbon]: E. Gibbon, *History of the decline and fall of the Roman empire*, 1776-1788.
[Gille IR]: B. Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, Paris 1964 (trad. it.: *Leonardo e gli ingegneri del Rinascimento*, Milano 1972).
[Gille macchine]: - *Macchine* (in [HT], vol.2).
[Gillings]: R.J. Gillings, *Mathematics in the time of the pharaos*, New York 1972.
[GMW]: Thomas I. (ed.), *Greek Mathematical Works*, Loeb Classical Library, Harvard/London 1939 (rist. 1980).
[Goldstein]: B.R. Goldstein, *The Arabic Version of Ptolemy's Planetary Hypotheses*, "Trans. Amer. Philos. Soc.", N.S., 57, 4, 1967.
[Gombrich]: E.H. Gombrich, *The Story of Art*, 1984^{14} (trad. it.: *La storia dell'arte raccontata da E.H. Gombrich*, Torino 1993).
[Goodchild]: R.G. Goodchild, *Porti, darsene e fari* (in [HT], vol.2).
[Gould]: J.B. Gould, *The philosophy of Chrysippus*, Leiden 1970.
[Govi: Tolomeo]: *L'Ottica di Claudio Tolomeo... ridotta in latino sovra la traduzione araba di un testo greco imperfetto ... pubblicata da Gilberto Govi*, Torino 1885.
[Grasshoff]: G. Grasshoff, *The history of Ptolemy's star catalogue*, Berlin/Heidelberg/New York 1990.
[Hall]: A.R. Hall, *Tecnologia militare* (in [HT], vol.2).
[Halley: Apollonio]: Edmond Halley, *Apollonii Pergaei conicorum libri octo et Sereni Antissensis de sectione cylindri et coni*, Oxford 1710.
[Harrison]: J. Harrison, *The Library of Isaac Newton*, Cambridge 1978.
[Heath: Apollonio]: *Apollonius of Perga: Treatise on conic sections*, edited in modern notation by T. L. Heath, Cambridge 1896.
[Heath Aristarchus]: T.L. Heath, *Aristarchus of Samos. The ancient Copernicus. A History of Greek Astronomy to Aristarchus*, Oxford 1913; rist. New York 1981.
[Heath *Elementi*]: *The thirteen books of Euclid's Elements*, transl., introd. & comm. by T. L. Heath, Cambridge 1925^2; rist. New York 1956.
[Heath HGM]: T.L. Heath, *A History of Greek Mathematics*, Oxford 1921; rist. New York 1981.

[Heiberg GMNA]: J.L. Heiberg, *Geschichte der Mathematik und Naturwissenschaften im Altertum*, München 1960.
[Heiberg MA]: - *Mathematisches zu Aristoteles*, in "Abhand. zur Gesch. d. math. Wissenschaften", XVIII Heft, 1-49, 1904.
[Heisenberg]: W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, New York 1958.
[Henderson]: I. Henderson, *L'antica musica greca* (in [OHM], vol.1).
[Heronis OO]: *Heronis Alexandrini Opera quae supersunt omnia*, Leipzig 1899 segg.
[Holmyard Alchemy]: E.J. Holmyard, *Alchemy*, Baltimore 1957 (trad. it.: *Storia dell'Alchimia*, Firenze 1972).
[Holmyard AA]: - *Gli apparecchi dell'Alchimia* (in [HT], vol. 2).
[HT]: C. Singer et al., *A History of Technology*, Oxford 1956 (trad. it.: *Storia della Tecnologia*, Torino 1966^2).
[Hultsch GRM]: F. Hultsch, *Griechische und Römische Metrologie*, Berlin 1882^2; rist. 1971.
[Hultsch PGES]: - *Poseidonios über die Grösse und Entfernung der Sonne*, "Abhand. der königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen", philolog.-hist. Kl. N.F. Bd., 1897.
[Jammer CF]: M. Jammer, *Concepts of force. A study on the foundations of dynamics*, Harvard 1957 (trad. it.: *Storia del concetto di forza*, Milano 1971).
[Jammer CM]: – *Concept of mass in classical and modern physics*, Harvard 1961 (trad. it.: *Storia del concetto di massa nella fisica classica e moderna*, Milano 1974).
[Johnson]: A.C. Johnson, *Roman Egypt to the Reign of Diocletian*, in T.Frank (ed.), *Economic Survey of Ancient Rome*, Baltimore 1936.
[Jones A.]: A. Jones, *Peripatetic and Euclidean theories of the visual ray*, "Physis", vol. XXXI, N.S., fasc. 1, 47-76, 1994.
[Jones H.]: H.L. Jones, note in *The Geography of Strabo transl. by H. L. Jones*, Loeb Classical Library, London/Cambridge, Mass. 1917.
[Kepler OO]: *Johannis Kepleri Opera Omnia*, ed. Ch. Frisch, Francofurti a. M. 1870.
[Kisa]: A. Kisa, *Das Glas im Altertum*, Leipzig 1903.
[Kline]: M. Kline, *Mathematics in Western Culture*, Oxford 1953 (trad. it.: *La matematica nella cultura occidentale*, Milano 1976).
[Koyré RA]: A. Koyré, *La révolution astronomique*, Paris 1961 (trad. it.: *La rivoluzione astronomica*, Milano 1966).
[Koyré SG]: – *Etudes galiléennes*, Paris 1966 (trad. it.: *Studi galileiani*, Torino 1976).
[Koyré MPUP]: – *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione* (in trad. it. Torino 1967).
[Kuhn CR]: T.S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Harvard 1957 (trad. it.: *La rivoluzione copernicana*, Torino 1972).
[Kuhn SSR]: – *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago 1962 (trad. it.: *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino 1969).
[Lane]: E.W. Lane, *Manners and Customs of the Modern Egyptians*, 1981.
[Lasserre]: F. Lasserre, *The Birth of Mathematics in the Age of Plato*, London 1964.
[Last]: H. Last, *La politica sociale di Augusto* (in [C.A.H.], vol.VIII).
[Leach]: E.R. Leach, *Computo primitivo del tempo* (in [HT], vol.1).

[Lejeune CG]: A. Lejeune, *Recherches sur la catoptrique grecque ...*, Acad. Royale de Belgique, Classe des Lettres, Mém. 52, fasc. 2, 1957.
[Lejeune EP]: – *Euclide et Ptolémée, deux stades de l'optique géométrique grecque*, Louvain 1948.
[Leonardo]: *The Notebooks of Leonardo da Vinci, compiled and edited ... by Jean Paul Richter*, London 1883; rist. New York 1970.
[Lethbridge]: T.C. Lethbridge, *Costruzioni navali* (in [HT], vol.2).
[Long]: A.A. Long, *Hellenistic Philosophy. Stoics, epicureans, sceptics*, London 1974 (trad. it.: La *filosofia ellenistica. Stoici, epicurei e scettici*, Bologna 1989).
[Long Sedley]: A.A. Long, D.N. Sedley, *The Hellenistic Philosophers*, Cambridge 1988.
[Loria]: G. Loria, *Le scienze esatte nell'antica Grecia*, Milano 1914; rist. Milano 1987.
[Mach]: E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt*, 1883 (trad. it.: *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino 1968).
[Maier]: F.G. Maier et al., *Fischer Weltgeschichte* 13: *Byzanz*, Frankfurt am Main 1973 (trad. it: *L'impero bizantino*, in *Storia Universale Feltrinelli*, vol. 13, Milano 1974).
[Malcolm]: N. Malcolm, *de Dominis (1560-1624): Venetian, Anglican, Ecumenist and Relapsed Heretic*, London 1984.
[Mamiani]: M. Mamiani, *La scienza esatta delle profezie*, introduzione a I. Newton, *Trattato sull'Apocalisse*, Torino 1994.
[Manfredi]: V. Manfredi, *Le Isole Fortunate*, Roma 1993.
[Mark Smith]: A. Mark Smith, *Alhazen's Debt to Ptolemy's Optics*, in T.H. Levere and W.R. Shea eds., *Nature, Experiment and the Science*, the Netherlands 1990.
[Marsden HD]: E.W. Marsden, *Greek and Roman artillery: Historical development*, Oxford 1970.
[Marsden TT]: – *Greek and Roman artillery: Technical treatises*, Oxford 1971.
[Martin]: R. Martin, *Il fenomeno dell'urbanizzazione e la mobilità della popolazione* (in [SCG], vol. 10).
[Mates]: B. Mates, *Stoic logic*, Berkeley/Los Angeles 1953.
[Medaglia Russo]: S.M. Medaglia, L. Russo, *Sulla presunta accusa di empietà ad Aristarco di Samo*, "Quaderni urbinati di cultura classica" (di prossima pubblicazione).
[MGM]: *Mathematici Graeci Minores*, edidit J. L. Heiberg, Copenaghen 1927.
[Mugler: Archimède]: *Archimède*, texte établi et traduit par C. Mugler, Paris, 1971, 4 voll.
[Musatti]: C. Musatti, introduzione a *Artemidoro di Daldi, "Dell'interpretazione de' sogni"*, Milano 1985.
[Musurus]: M. Musurus, *Ἐπιστολαὶ διαφόρων φιλοσόφων ῥετόρων σοφιστῶν*, Venezia 1499.
[Neugebauer ACT]: O. Neugebauer, *Astronomical Cuneiform Texts*, London 1955.
[Neugebauer EHA]: – *The Early History of the Astrolabe*, "Isis", 40, 240, 1949.

[Neugebauer ESA]: – *The Exact Sciences in Antiquity*, Providence, Rhode Island 1957 (trad. it.: *Le scienze esatte nell'Antichità*, Milano 1974).
[Neugebauer HAMA]: – *A History of ancient mathematical Astronomy*, Berlin/Heidelberg/New York 1975.
[Neugebauer Heron]: – *Über eine Methode zur Distanzbestimmung Alexandria-Rom bei Heron*, "Kgl. Danske Vidensk. Selsk", Hist.-filol. Medd., 26, 2 (1938) e 26, 7(1939).
[Newton *Scolii classici*]: P. Casini, *Newton, gli Scolii Classici; presentazione, testo inedito e note*, in "Giornale critico della filosofia italiana", 1, LX, 1981, 7-53.
[OGIS]: W. Dittenberger, *Orientis Graeci inscriptiones selectae*, Leipzig 1903-1905.
[OHM]: *The New Oxford History of Music*, vol.I: *Ancient and Oriental Music*, Oxford 1957 (trad. it.: *Storia della musica*, Milano 1991).
[Ovio: Euclide]: G. Ovio, *L'Ottica di Euclide*, Milano 1918.
[Ovio oculistica]: – *L'oculistica ai tempi dell'impero romano*, Roma 1940.
[papiri alchimistici]: *Les alchimistes grecs*, Tome I: *Pap. de Leyde, Pap. de Stockholm, Fragments de recettes*; texte établi et traduit par R. Halleux, Paris 1981.
[Pauly-Wissowa]: *Paulys Real-Encyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*. N. Bearbeitung beg. von Georg Wissowa fortgeführt, Stüttgart/Munich 1894-1974.
[Pfeiffer]: R. Pfeiffer, *History of Classical Scholarship*, Oxford 1968 (trad. it.: *Storia della filologia classica*, Napoli 1973).
[Philons Mechanik]: *Exzerpte aus Philons Mechanik* B. VII und VIII (H. Diels, E. Schramm eds), "Abhand. der Preussischen Akad. d. Wissenschaften", philos.-hist. Kl, Nr 12, Berlin 1920.
[Pirenne MC]: H. Pirenne, *Mahomet et Charlemagne*, Bruxelles 1937.
[Pirenne VMA]: – *Les villes du Moyen Age*, Bruxelles 1927.
[Poëte]: M. Poëte, *Introduction à l'urbanisme*, Paris 1929.
[Popper OSE]: K.R. Popper, *The Open Society and its Enemies*, London 1966[5].
[Popper PH]: – *The Poverty of Historicism*, London 1957.
[Prager: Filone]: Philo of Byzantium, *Pneumatica*, ed. F.D. Prager, Wiesbaden 1974.
[Préaux ERL]: C. Préaux, *L'économie royale des Lagides*, Bruxelles 1939.
[Préaux SPSEH]: - *Stagnation de la pensée scientifique à l'époque hellénistique*, in *Stud. in hon. C.B. Welles*, New Haven 1966.
[Price gears]: D.J. Price, *Gears from the Greeks. The Antikythera Mechanism – A Calendar Computer from ca. 80 B.C.*, "Trans. Am. Phil. Soc.", vol. 64, part 7, 1974.
[Price science]: – *Science Since Babylon*, New Haven/London 1976 .
[Price strumenti]: – *Strumenti di precisione fino al 1500* (in [HT], vol.3).
[Prima di Leonardo]: AA.VV., catalogo della mostra *Prima di Leonardo. Cultura delle macchine a Siena nel Rinascimento*, Siena, Magazzini del Sale, 9 giugno-30 settembre 1991 (Milano 1991).
[Rashed GD]: R. Rashed: *Géométrie et dioptrique au Xe siècle. Ibn Sahl, Al-Qūhī) et Ibn Al-Haytham*, Paris 1993.
[Rashed PA]: – *A Pioneer in Anaclastics. Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses*, "Isis", 81, 1990, 464-491.

[Rawlins ESNM]: D. Rawlins, *The Eratosthenes-Strabo Nile Map. Is It the Earliest Surviving Instance of Spherical Cartography? Did it Supply the 5000 Stades Arc for Eratosthenes' Experiment?*, "Archive for History of Exact Sciences", 26, 211-219, 1983.
[Rehm]: A. Rehm, *Zur Rolle der Technik in der gr.-röm. Antike*, "Arch.f. Kulturg.", xxviii (1938).
[Rodier]: G. Rodier, *La Physique de Straton de Lampsaque*, thèse pour le doctorat, Paris 1890.
[Ronchi]: V. Ronchi, *Storia della luce*, Bologna 1939.
[Rosenfeld]: B.A. Rosenfeld, *A History of Non-Euclidean Geometry*, Berlin/ Heidelberg/ New York 1988.
[Rostovzev ET]: M. Rostovzev, *L'Egitto tolemaico* (in [CAH], vol.V).
[Rostovzev LEE]: – *A large Estate in Egypt in the III Century b.C.*, Madison 1922.
[Rostovzev Pergamo]: – *Pergamo* (in [CAH], vol.VI).
[Rostovzev SESME]: – *Social and Economic History of the Hellenistic World*, Oxford 1953 (trad. it.: *Storia economica e sociale del mondo ellenistico*, Firenze 1966-1980).
[Rostovzev SO]: – *La Siria e l'Oriente* (in [CAH], vol.V).
[Russo A.]: A. Russo, *Marc'Antonio de Dominis Arcivescovo di Spalato e Apostata*, Napoli 1964.
[Russo 1]: L. Russo, *Sulla non autenticità delle definizioni degli enti geometrici fondamentali contenute negli Elementi di Euclide*, "Bollettino dei classici", Accademia dei Lincei, XIII, 25-44, 1992.
[Russo 2]: – *Un brano di Plutarco (Moralia, 923C-924A) e la storia della dinamica*, "Bollettino dei classici", Accademia dei Lincei, XIV, 80-92, 1993.
[Russo 3]: – *Il contenuto scientifico di un brano di Lucrezio (IV, 387-396)*, "Bollettino dei classici", Accademia dei Lincei, XIV, 93-95, 1993.
[Russo 4]: – *Vitruvio (IX, i, 11-14): un brano di argomento astronomico*, "Bollettino dei classici", Accademia dei Lincei, XIV, 96-102, 1993.
[Russo 5]: – *The astronomy of Hipparchus and his time: a study based on pre-Ptolemaic sources*, "Vistas in Astronomy", vol. 38, pp. 207-248, 1994.
[Russo 6]: – *L'astronomo Seleuco, Galileo e la teoria della gravitazione*, "Quaderni urbinati di cultura classica", 1, 1995, 143-160.
[Russo 7]: – 2° contributo in: S. M. Medaglia, L. Russo, *Sulla prima 'definizione' dell'Ottica di Euclide*, "Bollettino dei classici", Accademia dei Lincei, XVI, 41-54, 1995.
[Russo 8]: – *The definitions of fundamental geometric entities contained in Book I of Euclid's Elements*, "Archive for History of Exact Sciences" (di prossima pubblicazione).
[Sambursky]: S. Sambursky, *The physical world of the Greeks*, London 1956 (trad. it. parziale: *Il mondo fisico dei Greci*, Milano 1959).
[Sarton]: G. Sarton, *Introduction to the History of Science*, Baltimore 1927-1948.
[de Saussure]: F. de Saussure, *Cours de linguistique générale*, Paris 1922.
[SCG]: *Storia e civiltà dei Greci*, diretta da R. Bianchi Bandinelli, Milano 1977 sgg., 10 voll.

[Schiaparelli]: G. Schiaparelli, *Scritti sulla storia dell'astronomia antica*, Bologna 1926.
[Schmandt-Besserat]: D. Schmandt-Besserat, *Conto e contabilità nel Medio Oriente preistorico*, pp.54-59 in F.M. Fales, *Prima dell'alfabeto*, Venezia 1989.
[Scienziati del '600]: *Galileo e gli scienziati del Seicento*, tomo II, *Scienziati del Seicento*, a cura di M. L. Altieri Biagi e di B. Basile, Milano/ Napoli 1980.
[Sellin]: R. Sellin, *The Large Roman Water Mill at Barbegal (France)*, "History of Technology", 8, 91-109, 1983.
[Singer]: C. Singer, *Epilogo* al II volume di [HT].
[Singer Price Taylor]: C. Singer, D.J. Price, E.G.R. Taylor, *La cartografia, il rilevamento e la navigazione fino al 1400* (in [HT], vol.3).
[Snell]: B. Snell, *Die Entdeckung des Geistes. Studien zur Entstehung des europäischen Denkens bei den Griechen*, Hamburg 1955[2] (trad. it.: *La cultura greca e le origini del pensiero europeo*, Torino 1963).
[Solmsen]: F. Solmsen, *Greek philosophy and the discovery of the nerves*, "Museum Helveticum", 18, 1961.
[Sosio]: L. Sosio, *Galileo e la cosmologia*, saggio premesso all'edizione a cura di Sosio di Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Torino 1970.
[von Staden]: H. von Staden, *Herophilus. The Art of Medicine in Early Alexandria*, Cambridge 1989.
[Stahl]: W.H. Stahl, *Roman Science*, Madison, 1962 (trad. it.: *La scienza dei Romani*, Roma/Bari 1974).
[Stamatis: Elementi]: Euclides, *Elementa*. Post I. L. Heiberg edidit E. S. Stamatis, Leipzig 1969 sgg.
[Suter: al-Bīrūnī]: *Das Buch der Auffindung der Sehenen im Kreise von Abū'l-Raihān Muḥammad-al-Bīrūnī*, Übersetzt von H. Suter, "Bibl. Math.", ser.3, vol. 11, (1910).
[SVF]: H. von Arnim, *Stoicorum veterum fragmenta*, Leipzig 1903-1905.
[Szabó]: A. Szabó, *The Beginnings of Greek Mathematics*, Dortrecht/Boston, Mass. 1978.
[Tarn]: W.W. Tarn, *L'eredità di Alessandro* (in [CAH], vol. V).
[Taylor]: E.G.R. Taylor, *La cartografia, il rilevamento e la navigazione,1450-1750* (in [HT], vol.3).
[Tölle-Kastenbein]: R. Tölle-Kastenbein, *Antike Wasserkultur*, München 1990 (trad. it.: *Archeologia dell'acqua*, Milano 1993).
[Toomer: *Almagesto*]: *Ptolemy's Almagest*, transl. and annot. by G.J. Toomer, London 1984.
[Toomer Apollonio]: G.J. Toomer, *Apollonius of Perga* (in [DSB], vol.I).
[Toomer: Diocle]: Diocles, *On Burning Mirrors*, The Arabic transl. of the Lost Greek Original. Edited, with English transl. and Comm. by G.J. Toomer, Berlin/ Heidelberg/ New York 1976.
[Toomer HDSM]: - *Hipparchus on the Distances of the Sun and Moon*, "Archive for History of Exact Sciences", 14, 1974, 126-142.
[Torraca]: L. Torraca, *L'astronomia lunare in Plutarco*, in *Plutarco e le scienze*, Genova 1992 (atti del IV Convegno plutarcheo, Genova – Bocca di Magra 22/25 aprile 1991).
[Usher]: A.P. Usher, *Macchine e meccanismi* (in [HT], vol.3).

[van der Waerden]: B.L. van der Waerden, *Science Awakening*, transl. A. Dresden, Groningen 1954.
[Ver Eecke]: introduzione in P. Ver Eecke, *Euclide. L'Optique et la Catoptrique*, Paris-Bruges 1938.
[Villard de Honnecourt]: Villard de Honnecourt, *Sketchbook*, ed. T. Bowie, Bloomington 1959.
[Vogel]: K. Vogel, *La scienza a Bisanzio* (in [CMH], vol. III).
[Vogt]: H. Vogt, *Versuch einer Wiederherstellung von Hipparchs Fixsternverzeichnis*, "Astronomische Nachrichten", CCXXIV, 5354-55, 1925.
[von Fritz]: K. von Fritz, *The Discovery of Incommensurability by Hippasus of Metapontum*, "Annals of Mathematics", vol. 46 (1945), pp. 242-264.
[Wallis]: *An Essay of Dr. John Wallis, exhibiting his Hypothesis about the Flux and Reflux of the Sea*, "Phil. Trans.", N.16, August 1666, pp. 263-289
[Weber]: C.W. Weber, *Panem et Circenses*, Düsseldorf/Wien 1983 (trad. it., Milano 1986).
[Westermann]: W.L. Westermann, *Upon Slavery in Ptolemaic Egypt*, New York 1929.
[Wittfogel]: K.A. Wittfogel, *Oriental Despotism. A Comparative Study of Total Power*, Yale 1957.
[Woodbury]: R.S. Woodbury, *History of the Lathe*, Boston 1961.
[Yates]: F.A. Yates, *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*, London/Chicago 1964.
[Zeuthen]: H.G. Zeuthen, *Die geometrische Konstruktion als "Existenzbeweis" in der antiken Geometrie*, "Mathematische Annalen", 47, 1896, pp. 222-228.
[Ziggelaar]: A. Ziggelaar, *Die Erklärung des Regenbogens durch Marcantonio de Dominis, 1611. Zum Optikunterricht am Ende des 16. Jahrhunderts*, "Centaurus", 23, 1979, 21-50.
[Zosimo]: *Les alchimistes grecs*, Tome IV, 1re partie: Zosime de Panopolis, *Mémoires authentiques*; texte établi et traduit par M. Mertens, Paris 1995.

Indice dei nomi

Abdaraxo (ingegnere ellenistico), 117-118
Abraham Echellensis, 322
Adelardo di Bath, 226
Aezio (dossografo), 105n(103), 172n(66), 278n(147), 279n(149, 150), 311, 312n(93, 94)
Aezione (pittore), 81
Agnodice (medico della scuola di Erofilo), 168
Agrippa (astronomo), 259n(93)
Alberto Magno, 332n(141)
Alessandro di Afrodisia, 176, 176n(86), 256n(79)
Alessandro Magno, 26, 26n(9), 27, 36, 39, 40, 41, 41n(38), 81, 89, 134, 170, 196
Alessandro Poliistore, 174n(71)
Alfonso X di Castiglia, 289
Alhazen, vedi Ibn al-Haytham
Amici Giovanni Battista, 294
Ammonio Ermia, 286
Amr ibn al-'Āṣ, 205n(22)
Anassagora, 39, 39n(35), 80, 80n(7), 100n(82), 172, 172n(65)
Anassimandro, 172, 172n(66), 274n(131), 341
Anatolio (vescovo di Laodicea), 222, 222n(1)
Andrea (medico della scuola di Erofilo), 168
Annibale, 178
Antemio di Tralle, 285-286, 287n(5)
Antifilo (pittore ellenistico), 219n(66)
Antigono II di Macedonia, 126, 127n(38)
Antioco I (Sotèr), 184
Antipatro di Tessalonica, 140-141
Antistene (discepolo di Socrate), 236, 240
Antonio Diogene, 124
Apelle (pittore), 81
Apollonio (dieceta di Tolomeo II), 179, 180, 193n(64), 198, 199
Apollonio di Mindo, 280-281, 323n(121)
Apollonio di Perga, 25, 28, 28n(12), 59, 59n(27), 60, 61n(34), 72, 75, 83-84, 100, 100n(83), 109, 113-114, 118, 131n(55), 163n(29), 223, 236, 237, 259, 285, 286, 287n(5), 301, 309, 322-323, 324, 328, 343
Apollonio di Tiana, 204n(14)
Apollonio Mys, 203n(8)
Apollonio Rodio, 199n(94)
Apuleio, 84, 84n(27), 86, 86n(43)
Arato di Soli, 100, 260n(101)
Archia di Corinto, 127
Archimede, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 35, 43-45, 46, 48, 55, 55n(19), 59, 59n(26), 60, 66, 66n(46),

67-71, 72, 82, 82n(15), 83-86, 91-97, 99n(80), 100-104, 106, 106n(106), 107n(107), 115-116, 119n(9), 121n(16), 122, 126-127, 129n(46), 131-132, 133, 134, 144n(110), 145, 147, 148n(128), 151n(137), 156, 159n(15), 163n(29), 178n(93), 184, 204, 224, 224n(10), 229-230, 236, 241-242, 250, 258n(89, 90), 273-275, 285, 285n(1), 286, 286n(2), 287, 290, 296, 296n(39, 40), 300, 301, 302, 305, 315, 317, 319, 320, 321, 328, 329, 330, 330n(135), 331, 334, 337, 343-346
Archita di Taranto, 54n(14), 65n(42), 93-94, 95n(63)
Aristarco di Samo, 21, 27, 27n(11), 87, 87n(45), 99-108, 111, 172, 224, 262, 264, 273, 274, 278, 279, 279n(148), 294, 295, 311, 315, 319, 324, 332, 332n(144, 145)
Aristarco di Samotracia, 215, 215n(52)
Aristide (pittore), 225
Aristofane (commediografo), 152n(138)
Aristofane di Bisanzio, 215, 216
Aristomaco di Soli, 189
Aristone (funzionario tolemaico), 186n(29)
Aristone (produttore di ceramiche), 193
Aristosseno di Taranto, 220, 220n(71)
Aristotele, 36, 36n(27), 37, 38n(33), 39n(34), 42, 43, 43n(41), 44, 46, 51, 52n(11), 53n(12,13), 56, 56n(20), 65, 65n(44), 66, 66n(47), 71, 71n(54), 72, 73, 88, 88n(48), 89, 97, 97n(70), 99n(80), 102, 105, 121, 121n(13), 155, 155n(3), 156, 158n(11), 162, 162n(26), 164, 170-171, 172, 172n(64, 65), 203, 203n(9), 204n(15, 16), 206n(25), 212, 215n(54), 216n(55), 224-225, 234, 235, 235n(2), 236, 236n(3), 237n(11), 243, 244, 251n(62, 63), 252, 253, 254, 256, 271, 272, 272n(125, 126), 273, 276, 279, 282, 285, 301, 303, 314, 315, 321
Arriano di Bitinia, 247n(49)
Artemidoro di Daldi, 207-212, 220, 319
Asclepiade di Prusa, 178n(92)
Asclepiodoro (scrittore e artista ateniese), 81, 81n(11)
Ateneo di Naucrati, 28, 28n(14), 71, 122n(20), 123n(24), 126n(36), 127, 127n(39, 40), 132, 132n(57), 146n(120), 150n(129), 188, 188n(43), 202n(6), 220n(71), 221n(75)
Ateneo Meccanico, 137, 137n(82), 183
Attalo I di Pergamo, 137, 183
Attalo III di Pergamo, 183
Augusto, imperatore, 231, 231n(38), 281
Aureliano, imperatore, 225n(16)
Aurispa Giovanni, 290, 290n(21)
Avicenna, vedi Ibn Sīnā

Bacone Ruggero (*Roger Bacon*), 85n(35), 151, 151n(134), 153, 297, 326, 326n(131), 327, 332, 332n(141)
Baliani Giovan Battista, 322n(117)
Barrow Isaac, 178n(93)
Barthes Roland, 217-218
Bartolo Giovanni, 298, 298n(47)
Beda il Venerabile, 231
Benevolo Leonardo, 207, 207n(27)
Bergk Theodor, 102n(92)
Bernhardy Godofredus, 26n(8)
Bernoulli Daniel, 110n(116)
Berosso, 184
Berthelot Marcelin, 174n(74)
Bianchi Bandinelli Ranuccio, 80n(6), 81n(12), 218n(63)
Bieżuńska-Małowist Iza, 199n(92, 93, 95), 200, 200n(98)

al-Bīrūnī, 145, 145n(112), 288n(12)
Bitone, 137, 137n(85), 183
Bloch Marc, 122n(21), 141, 141n(96, 97), 142, 148, 229n(30)
Bocheński I.M., 213n(48)
Bohr Niels, 337-338, 339, 340n(3)
Bolo Democrito, 176
Boltzmann Ludwig, 339
Bolyai János, 335n(152)
Bonelli Federico, 305n(71), 312n(93), 322n(117)
Bonnin J., 130n(50),
Borelli Giovanni Alfonso, 322
Born Max, 339, 339n(1)
Boulliau Ismael, 326, 326n(130), 327, 333
Bowman Alan K., 190n(50), 200n(99), 205n(22)
Boyer Carl, 49, 49n(1), 58, 58n(24), 61, 77n(69), 112n(125), 230n(34), 310, 330, 330n(136), 331n(137)
Boyle Robert, 178n(93), 325n(128)
Bozzi Paolo, 36n(26)
Brahe Tycho, 260
Braudel Fernard, 136n(80)
Brentano Franz C., 337n(160)
Bresciani Edda, 50n(5)
Broglie Louis Victor de, 337-338
Bromehead C.N., 190-191, 192, 192n(62, 63)
Brown Robert, 38n(32)
Bruno Giordano, 105n(101)
Büchsenschütz, 211

Calcagnini Celio, 311-312
Caligola, imperatore, 196
Callia (architetto), 134n(68)
Callimaco di Cirene, 100n(83), 183, 215, 219, 280n(155)
Callippo di Cizico, 100
Callisseno di Rodi, 146
Canfora Luciano, 182n(18), 205n(22), 225n(16)
Cardano Gerolamo, 137
Carpo di Antiochia, 116n(136)
Carra de Vaux Bernard, 92n(59), 288n(11), 304n(65), 251n(61)
Cartesio, vedi Descartes René
Casini Paolo, 319n(113)
Cassini Gian Domenico, 258n(91)
Cassio Dionisio di Utica, 190n(49)
Casson Lionel, 125n(35), 139n(90)
Catullo (Caio Valerio), 100n(83)
Cauchy Augustin-Louis, 331n(137), 334, 336, 336n(158)
Cavalieri Bonaventura, 129, 305, 322
Celio Aureliano, 156n(8), 168, 168n(46), 169, 169n(51)
Celso (Aulo Cornelio), 162, 162n(24)
Cesalpino Andrea, 312, 312n(91, 93)
Cesare (Caio Giulio), 205n(20), 225n(16), 231
Chaplin Charles S., 200n(101)
Cherniss Harold, 253n(71), 255n(73)
Childe V.Gordon, 201n(1)
Cicerone (Marco Tullio), 104, 104n(98, 100), 197, 197n(89), 203n(13), 210, 210n(36), 225, 225n(15), 226, 226n(18), 251n(59), 284n(171)
Cida (bibliotecario di Alessandria), 91n(56)
Cilone di Crotone, 234n(44)
Clagett Marshall, 256n(82), 303n(63)
Clayton Peter A., 128n(45)
Clemente Alessandrino, 234n(44)
Cleomede (astronomo), 85n(32), 88, 88n(47), 246-247
Cleone (ingegnere ellenistico), 186
Cohen Morris R., 30n(21), 256n(82)
Colombo Cristoforo, 91, 91n(55), 123, 293
Commandino Federico, 104
Conone di Samo, 100, 100n(83), 113
Copernico (*Nicolaus Copernicus*), 23, 110n(117), 234, 234n(45), 279n(148), 294, 294n(33), 308, 311, 319, 325n(126)

Cousteau Jacques-Yves, 139n(90)
Crisippo di Soli, 24, 28, 176, 196, 203, 203n(10, 11, 12, 13), 213-214, 216, 216n(57), 218, 259n(94), 337
Crisogono Federico, 313, 313n(100), 314n(100), 333
Crizia, 204n(17)
Crombie Alistair C., 299n(49), 331n(140)
Ctesibio, 27, 27n(10), 97-98, 99n(80), 119n(9), 121-122, 127n(38), 132-133, 135, 143n(105), 145, 146, 147, 157-158, 159, 182, 192, 192n(63), 204, 220, 224, 304, 306, 315

Dante Alighieri, 295,
Darwin Charles R., 172n(60), 333
Darwin George H., 277, 277n(140), 312n(94), 313n(99), 333
Dedekind Julius W.R., 64, 64n(39), 337
Della Porta Giambattista, 143, 143n(105), 299, 299n(50), 305, 332
De Mauro Tullio, 163, 163n(28)
Demetrio (funzionario tolemaico), 180, 198
Demetrio di Apamea, 168
Demetrio Falereo, 151n(135)
Demetrio I di Macedonia (Poliorcete), 134
Democare (politico e storico ateniese), 151n(135)
Democrito, 37, 38, 38n(30, 31, 33), 80, 80n(7), 97, 97n(69), 100n(82), 162, 162n(27), 163n(27), 251, 251n(59)
Demonatte (filosofo cinico), 177
Demostene Filalete, 169, 203n(11), 296n(37)
Descartes René, 22, 278n(145), 298, 300, 307, 309-310, 318, 329, 334
Dicearco, 89, 89n(50), 90
Diels Hermann, 38n(29, 30, 33), 39n (35), 52n (11), 97n (69, 71), 146, 162n (27), 173n (67), 177n (89), 234n (44), 274n (131)
Dijksterhuis Eduard J., 55n(19), 122n(18), 144, 144n(110), 149, 198
Diocle (matematico), 83-84, 129n(46), 286, 287n(5)
Diocle di Magnesia, 216n(57)
Diocleziano, imperatore, 231
Diodoro Crono, 212
Diodoro Siculo, 23, 125, 125n(32), 132, 132n(56), 134, 134n(65), 190n(52), 191, 191n(58), 196, 196n(81), 258, 258n(90), 273, 273n(127)
Diofane di Bitinia, 190n(49)
Diofanto di Alessandria, 25, 29n(20), 60
Diogene Laerzio, 38n(37), 86, 86n(39), 93, 94n(63), 102n(94), 105n(103), 124n(27), 174n(71), 213n(46), 217, 217n(61, 62), 221n(73), 234n(44), 253n(68), 274n(129)
Dione di Prusa, 196, 196n(84), 205, 205n(19)
Dionigi Periegete, 257, 257n(86)
Dionisio Trace, 216, 216n(59)
Dionisodoro (citato da Plinio), 227-228
Dioscoride Pedanio, 174, 193
Disney Walt, 22
de Dominis Marco Antonio, 298-299, 300, 312-314, 333
Dositeo di Pelusio, 84, 84n(25), 129n(46), 323
Drabkin Israel Edward, 30n(21), 256n(82)
Drachmann A.G., 98n(75), 119n(9), 133n(62)
Drake Stillman, 300n(53)
Dreyer Johan L.E., 102n(92), 107-108, 110n(119)
Drower M.S., 130n(52)
Droysen Johan G., 22, 26, 26n(9)
Duhem Pierre M., 332n(146)
Düring J., 39n(36)
Dutka J., 247n(46, 48)

Ecfanto (pitagorico), 105, 279n(149)
Edelstein Ludwig, 202n(4)

Egetore (medico della scuola di Erofilo), 168n(47)
Einstein Albert, 35n(24), 108n(113)
Empedocle, 39, 39n(34), 97, 97n(71), 172, 173, 173n(67), 177, 177n(89), 305n(69)
Ennio (produttore di oggetti di vetro), 193
Enrico il Navigatore, 290
Enriques Federico, 29n(21), 160n(17), 200n(100), 251n(59)
Ensslin W., 290n(20)
Epicuro, 102n(94), 204n(16), 274n(129)
Epitteto, 259n(94)
Eraclide Pontico, 100, 105, 106, 108, 178n(92), 279, 279n(149), 329
Erasistrato di Ceo, 154, 155, 155n(6), 157, 167, 167n(43), 169n(48), 183
Eratostene di Cirene, 26n(8), 27, 88-91, 125n(31), 138, 138n(89), 172, 215, 227-228, 244-250, 260, 261, 273n(127), 275, 275n(135), 276, 277, 278, 294
Erodoto, 87, 87n(44)
Erofilo di Calcedonia, 22, 27, 27n(10), 47n(47), 143n(105), 154-169, 182, 184, 188, 203, 203n(11), 209-212, 220, 224, 227, 247, 282, 283, 295-296, 306, 307n(75), 315, 319
Erone di Alessandria, 29, 48, 60, 71, 80, 80n(4), 84, 84n(28), 92, 95n(65), 97-99, 118, 118n(6,7), 119-120, 122, 122n(19), 123, 132n(59), 135n(71), 137, 141-149, 157n(10), 161, 161n(21), 194, 194n(67, 72), 209, 222n(1), 239-243, 251, 251n(60, 61, 62), 252n(65), 255, 261, 271, 282, 285, 285n(2), 289, 289n(18), 291, 292, 299n(50), 304, 304n(65), 305, 305n(69), 310, 310n(88), 319, 321, 331, 332, 334, 334n(150)
Euclide, 22, 23, 27, 37, 46, 53, 54, 54n(14), 55, 56, 61-67, 70n(51), 72-74, 78, 79-93, 106, 112, 113, 129n(46), 156, 159-160, 163, 163n(29), 166n(40), 182, 214, 214n(50), 224, 224n(8), 226, 235-244, 268, 282, 287, 288, 301, 302, 316, 317, 319, 320, 331, 334-337, 339n(1), 345
Eudemo di Rodi, 51, 51n(7), 52
Eudosso di Cizico, 124
Eudosso di Cnido, 41, 55, 65-67, 100, 109, 223, 259, 259n(95), 294, 297n(43)
Euripide, 268
Eustazio di Tessalonica, 257, 257n(85)
Eutichio (patriarca di Alessandria), 205n(22)
Eutocio di Ascalona, 94n(63), 138n(89), 285-286
Evemero di Messene, 204
Evergete II, vedi Tolomeo VIII

Falloppio Gabriele, 155, 295-296
Fedeli Paolo, 225n(17)
Federico II di Svevia, 71
Feldhaus F.M., 132n(58)
Fidia, 117
Filippo II di Macedonia, 134
Filisco il Vecchio (pittore), 219n(66)
Filisco di Taso, 189
Filolao, 234n(44), 324, 326n(130)
Filone di Bisanzio, 25, 28, 48, 97-99, 131n(54), 132n(59), 133n (60), 135, 135n(74, 75), 136n (81), 137-138, 145, 145n(118), 146, 147, 186n(29), 255, 255n(75, 76), 289, 289n(17), 291, 291n(23), 292, 299n(50), 305, 305n(69, 72), 331, 332
Filone il Dialettico, 212-213, 215
Filonide (medico), 203n(8)
Filopono Giovanni, 285-286, 303, 303n(61, 62, 63), 321
Filostrato (Flavio), 204n(14)
Flavio Giuseppe, 128, 128n(43, 44), 190, 190n(53), 232, 232n(40)

Foco di Samo, 124n(27)
Forbes R.J., 140n(95), 141n(95), 142, 142n(100), 187, 188n(37), 191-192, 288n(10)
Fourier Joseph, 58n(25), 109, 110n(116), 333
Fozio, 124, 124n(29)
Fracastoro Girolamo, 294, 296-297
Francesco di Giorgio Martini, 291, 291n(24), 292
Franchi Saverio, 220, 220n(69)
Fraser P.M., 22n(1), 27n(10), 28n(15, 18), 115, 115n(131), 116, 116n(133, 135), 117n(1, 2, 3), 128n(45), 135, 135n(76, 77), 196n(85), 197n(86, 87, 88), 205n(18)
Frege Gottlob, 215, 215n(51), 217-218
Freud Sigmund, 208, 210-212, 319, 333
Friedlein G., 44n(42), 51n(7), 52n(9), 72n(55), 119n(8), 214n(50), 241n(29), 242n(34), 334n(151)
von Fritz Kurt, 53n(12)
Fromond Libert, 332n(144)
Frontino (Sesto Giulio), 230n(37)

Galeno (Claudio), 29, 47, 47n(47), 83, 83n(20), 154, 155n(5, 6), 157n(10), 160n(19), 164-167, 169, 209, 210n(34), 211, 216n(57), 222, 283, 287, 288, 295
Galilei Galileo, 22, 47, 47n(47), 73, 105n(101), 113, 122, 253, 278n(147), 298, 299, 300-307, 309, 311-312, 315, 319, 322n(117), 330, 332
Galilei Vincenzo, 301, 301n(54)
Gallavotti Carlo, 97n(71), 173n(67), 177n(89)
Gallavotti Giovanni, 110, 110n(117)
Garofalo Ivan, 167n(43)
Gauss Carl Friedrich, 331n(137), 335, 335n(152)
Gemino, 214n(50), 279, 279n(151), 334n(151)
Gentili Bruno, 220n(67, 68)
Gerone II di Siracusa, 43, 97, 126, 127, 184
Geymonat Ludovico, 77n(70), 115, 116, 116n(132, 133, 135), 230n(34)
Giamblico (filosofo neoplatonico), 39n(36), 59n(28), 223n(7), 234n(42, 43), 237, 237n(13)
Gibbon Edward, 228
Gilbert William, 331, 331n(140)
Gille Bertrand, 132n(58), 195n(77), 291n(22), 292, 292n(27, 28), 296n(39)
Gillings Richard J., 50n(4)
Goldstein B.R., 260n(97)
Gombrich Ernst H., 80n(3)
Goodchild R.G., 129, 129n(48)
Gould J.B., 203n(12)
Govi Gilberto, 85n(31,32), 86n(35,36), 260n(102), 299n(51)
Grasshoff Gerd, 247n(50), 260, 260n(101)
Guglielmo di Moerbeke (*Guillaume de M.*), 178n(93)

Hack Margherita, 341n(5)
Hall A.R., 135n(78)
Halleux Robert, 178n(91)
Halley Edmond, 279n(150), 280, 323, 323n(120, 121), 325, 326n(129), 336n(157)
Hamilton William R., 47
Harison Edward, 341
Harrison J., 320n(113)
Hārūn ar-Rashīd (califfo), 287
Heath Thomas L., 52n(10,11), 53n(13), 56n(20), 64, 64n(40), 65n(41, 43), 66n(48), 87n(45), 105n(102, 103), 144n(107), 145n(118), 147n(125), 160n(17), 226n(19), 236n(7, 10), 240n(26), 245n(41), 265n(112), 322n(118), 332n(144, 145), 334n(151)
Heiberg Johan Ludvig , 24, 30n(21), 66, 66n(48), 71, 83n(18), 100n(86), 125n(31),

144n(107), 160n(17), 238n(19), 240n(26)
Heine Heinrich Eduard, 64n(39)
Heisenberg Werner, 37, 37n(28)
Helmholtz Hermann L.F., 339
Henderson Isobel, 221n(75)
Hilbert David, 337, 337n(159), 339n(1)
Holmyard Eric John, 176n(84), 288n(9)
Hooke Robert, 325, 325n(128), 326n(128)
Hultsch Friedrich, 59n(27), 93n(60), 116n(136), 244n(39), 247n(48), 248n(51)

Ibn al-Haytham (Alhazen), 85n(35), 287-288, 299, 299n(50), 300
Ibn Sīnā (Avicenna), 288, 288n(11)
Ibn Sahl, 287-288, 300
Iceta di Siracusa, 105, 279n(149)
Igino (Caio Giulio), 168, 168n(44)
Ipazia, 29, 76n(67), 168n(45), 234
Ipparco di Nicea, 28, 47n(47), 86, 86n(37), 90, 100, 100n(84), 101, 101n(87), 110n(117), 146, 146n(123), 234, 234n(44), 248n(53), 254-257, 259-262, 263, 265-266, 272, 278, 279-284, 285, 286, 286n(4), 302-303, 323n(120), 325
Ippaso di Metaponto, 234, 234n(44), 284
Ippocrate di Cos, 154
Ippolito di Roma, 105n(103)
Isidoro di Mileto, 285-286, 287

Jacopo Angelo, 293
Jammer Max, 34, 35, 35n(23), 177n(88)
Johnson A.C., 193n(67)
Jones Alexander, 83n(18), 160n(17)
Jones H.L., 258, 258n(88)

Kamal ad-din al Farisi, 299
Kant Immanuel, 39
Keplero (*Johannes Kepler*), 129, 279n(148), 307-309, 310, 315, 320, 325, 326, 327, 329, 330, 334
Kisa A., 152n(142)
Kline Morris, 61, 61n(33), 62, 331n(138)
Kolmogorov Andrei N., 110n(117)
Koyré Alexandre, 122n(21), 234n(45), 253n(70), 302n(59), 326n(130)
Kuhn Thomas S., 17n(1), 35, 35n(25), 36, 295, 295n(35)

Lagrange Joseph-Louis, 35n(24), 47
Lambert Johan Heinrich, 335, 335n(153, 154), 336
Lane E.W., 190n(51)
Laplace Pierre-Simon de, 39
Lasserre François, 52n(10)
Last H., 231n(38)
Lavoisier Antoine-Laurent, 177
Leach E.R., 121n(12)
Leibniz Gottfried Wilhelm, 22
Lejeune Albert, 82n(16), 85n(35)
Leonardo da Vinci, 137, 137n(84), 143, 290-292, 293, 296, 296n(38, 39, 40, 41, 42), 297
Leone il matematico, 71n(53)
Leopoldo de' Medici, 306n(75)
Lethbridge T.C., 126-127
Leucippo, 37, 38, 38n(29, 32)
Leveau P., 195n(74)
Licofrone (sofista), 204n(16)
Licurgo (statista e oratore ateniese), 192
Liside di Taranto, 234, 234n(44)
Livio (Tito), 24, 83, 178, 178n(90), 191, 224n(10)
Ljubic S., 314n(101)
Lobačevskij Nicolaj I., 335, 335n(152), 336
Long Anthony A., 213-214, 216-218
Loria Gino, 52n(10), 237n(14)
Luciano di Samosata, 81, 81n(8), 124, 124n(28), 177
Lucrezio Caro (Tito), 25, 38n(32), 80, 80n(3), 86, 99n(82), 107,

107n(109), 173-174, 177, 177n(87), 189, 204n(17), 230n(33), 265, 265n(110), 303, 303n(63)
Lucullo (Lucio Licinio), 225n(15)

Mach Ernst, 91, 92n(57)
Macrobio (Ambrogio Teodosio), 283, 325
Magone (scrittore cartaginese), 190n(49)
Maier F.G., 287n(6)
Malcolm Noel, 314n(101)
Mamiani Maurizio, 324n(124)
al-Ma'mūn (califfo), 287
Manetone, 184
Manfredi Valerio, 125n(32)
Manilio (Marco), 281, 281n(159)
al-Maṇsūr (califfo), 287
Mantia (medico della scuola di Erofilo), 168
Marcellino (autore del *De Pulsibus*), 156, 156n(7)
Marcello (Marco Claudio, conquistatore di Siracusa), 104n(98), 116n(135), 224n(10)
Marcello (Marco Claudio, nipote del precedente, console nel 166 a.C.), 104n(98)
Maria Giudea, 168n(45), 175
Marino di Tiro, 90-91, 250
Mark Smith A., 287n(7)
Marsden E.W., 97n(72), 134n(69, 70), 135n(72, 73, 74, 75, 78), 136n(81), 137n(83, 85, 86), 138n(87), 145, 145n(116, 117)
Martin Roland, 206-207
Marx Karl, 42n(40)
Marziano Capella, 249, 249n(54)
Mates Benson, 213, 213n(48)
Medaglia Silvio M., 105n(101)
Ménage Gilles, 105n(101)
Menandro, 24
Menelao di Alessandria, 78, 335, 336, 336n(157)
Mertens Michèle, 174n(75), 175n(76), 176n(84)
Mesomede, 301n(54)
Metica (cortigiana), 123
Mirone, 117
Mitridate VI, re del Ponto, 140
Mnasone, tiranno di Elatea, 81n(11)
More Thomas, 188n(40)
Moschione (autore di una descrizione della nave *Siracusia*), 126n(36), 132n(57)
Mugler Charles, 44n(43), 55n(19), 70n(52), 92n(58), 95n(63, 64), 138n(89), 159n(15), 241n(31), 330n(135)
Mullis Kary, 341
Mummio (Lucio), 225, 225n(13)
Musatti Cesare, 207-209, 212
Musurus Marco, 234n(43)

an-Nairīzī, 241, 334n(151)
Napoleone I, 110n(116)
Nerone, imperatore, 152
Neugebauer Otto E., 30n(21), 50, 50n(6), 51n(8), 55n(17), 59n(26,28), 60n(31,32), 76n(66), 103n(96), 105n(102), 107-108, 110n(119), 111n(122, 123), 115n(130), 124n(25), 144n(107), 145n(111), 201n(3), 233n(41), 245n(41, 43), 255n(73), 260, 260n(98, 100), 294n(34), 310, 310n(188), 312n(94)
Newton Isaac, 38, 39, 47, 48, 86n(36), 102, 108n(113), 298, 298n(45, 46), 299n(49), 307, 314n(101), 314-327, 329, 330, 332, 333, 334
Nicomaco di Gerasa, 39n(36), 234n(42)
Numa Pompilio, 324

Olivieri Enzo, 195n(74)
Omar I (califfo), 141, 142, 205n(22)
Omero, 215n(53), 257
Oppiano di Anazarbo, 202n(6)
Orazio, 215n(54), 225
Oribasio, 160n(19)
Ovio Giuseppe, 152n(142), 160n(17)

Pāṇini, 216n(56)
Pappo, 29, 59n(27), 92, 93, 93n(60), 104, 104n(99), 116n(136), 189, 189n(47), 210n(37), 227, 233, 248n(51), 286, 309, 310, 310n(85), 338
Pasch Moritz, 337n(159)
Pattinson H.K., 191-192
Pauliśa, vedi Paulus di Alessandria
Paulus di Alessandria, 76
Peano Giuseppe, 75, 337, 337n(159)
Peregrino Pietro, 331-332
Peyrard F., 237n(12)
Pfeiffer Rudolf, 215n(52), 216n(58)
Piero della Francesca, 82n(14)
Pipino il Breve, 221n(72)
Pireico (pittore ellenistico), 219n(66)
Pirenne Henri, 232, 232n(39)
Pitagora, 39n(36), 41, 51, 52, 54, 54n(14), 221n(73), 234, 283, 284, 325, 326, 333
Pitea di Marsiglia, 124-125, 275n(135)
Platone, 22, 36, 46, 54, 54n(14, 15, 16), 55, 65n(41), 66, 71, 71n(54), 72, 79, 79n(2), 81, 81n(13), 95n(63, 65), 162, 162n(25, 27), 234, 234n(44), 235, 235n(2), 243, 244, 272n(126)
Plinio il Vecchio, 24, 81, 81n(10), 88, 88n(49), 146n(123), 152, 152n(140, 145), 161, 161n(22), 168n(45), 175, 175n(79, 80), 184n(23), 187, 187n(33), 188n(40), 189, 189n(46), 191, 191n(55), 219n(66), 225, 225n(13, 14), 226-228, 245n(39), 247n(49), 248, 248n(52), 249, 265-267, 271-272, 277, 277n(141, 142, 143), 279n(150), 280, 283, 283n(167), 297, 309, 309n(82), 321, 326
Plutarco, 43, 44, 44n(42), 71, 83, 86n(37), 93, 93n(61), 95n(63), 99n(81), 100n(82), 101, 101n(87, 89), 103, 105n(101), 116, 116n(133, 135, 136), 125, 125n(32), 133, 133n(64), 168n(48), 172n(63), 189n(45), 194n(68), 216n(57), 221n(73), 222, 224n(10), 242, 242n(32), 252-257, 263-265, 271, 274, 274n(128, 132), 275, 275n(133), 278, 278n(146), 294, 294n(33), 309, 310, 311, 311n(89, 90), 318-319, 321, 321n(116), 337
Poëte Marcel, 206, 206n(24)
Poincaré Henri, 339, 340n(4)
Polibio, 23, 28, 28n(13, 17), 83, 133, 133n(63), 151, 151n(135), 165, 165n(35), 178, 192, 192n(63), 224n(10)
Policleto, 117, 138
Popper Karl R., 18n(2), 172n(64), 202n(4), 204n(16), 235n(2), 244, 244n(37, 38)
Porfirio, 39n(36)
Posidonio di Apamea, 104, 124n(30), 148n(128), 172, 210, 257, 273n(127), 284, 313n(98)
Prager Frank David, 98n(75, 76, 78), 131n(54), 133n(62), 186n(29), 289n(17), 291n(23), 305n(69), 332n(143)
Prassagora di Cos, 155
Prassitele, 117
Préaux Claire, 179n(1), 224, 224n(9)
Pretagostini Roberto, 220n(68)
Price Derek J., 119n(9), 120n(11), 122n(17), 139-140, 153n(146), 288n(12), 289n(15), 297n(44)
Price Martin J., 128n(45)
Proclo, 43, 44, 51, 51n(7), 52n(9), 66, 72, 72n(55), 118, 119n(8), 162n(27), 214n(50), 241, 241n(29), 242, 242n(34), 243, 244n(38), 334n(151)

Quinto (fratello di Cicerone), 226
Qubt ad-din al-Shirazi, 299

Rashed Roshdi, 287n(7), 288n(8)
Rawlins D., 245n(39), 249n(55, 57)
Redi Francesco, 174n(71)
Rehm A., 132n(58), 261n(107)
Remmio Palemone, 216n(59)
Rhode A., 299
Roberval Gille Personne de, 332n(144)
Rodier G., 97n(69), 252n(65)
Ronchi Vasco, 160n(17)
Rosenfeld Boris A., 77n(68), 335n(154)
Rossane, 81
Rostovzev Michael, 22n(1), 25, 26n(7), 124n(30), 127n(42), 135n(73), 152n(141), 179n(1), 180n(3, 5, 6, 7), 181-182, 183n(19), 185, 185n(26, 28), 186, 186n(31, 32), 187n(34, 35), 188, 188n(39, 42), 189n(49), 191n(58), 193n(64, 65, 66), 194n(70), 196n(78, 80, 83), 197n(86), 199n(92, 94), 249n(56)
Ruelle C.E., 174n(74)
Rufo Efesio, 158, 158n(13), 169, 169n(49, 50), 282
Russo A., 314n(101)
Russo Lucio, 105n(101), 160n(17), 259n(93), 265n(110, 113), 278n(147), 312n(93), 322n(117)

Saccheri Giovanni G., 335n(153)
Salomon de Caus, 143
Sambursky S., 46, 46n(46), 122, 122n(22, 23), 321n(116)
Santillana Giorgio de, 29n(21), 160n(17), 251n(59)
Sarpi Paolo, 312, 312n(91)
Sarton George, 30n(21)
Satira (arpista), 200n(96)
Saussure Ferdinand de, 217
Schiaparelli Giovanni V., 109, 109n(115, 116), 259n(95)
Schmandt-Besserat Denise, 50n(3), 201n(2)
Schnitzer J., 293
Schramm E., 136, 137n(83, 84)
Scopas, 117
Seleuco I Nicatore, 167
Seleuco di Seleucia sul Tigri, 110, 111, 276-278, 279n(150), 280n (156), 311-313, 322n(117)
Sellin R., 194-195
Seneca (Lucio Anneo), 85n(32), 86, 86n(42), 226, 228-229, 262-265, 266, 278, 280-281, 282, 283, 319-320, 321, 323n(121)
Sertorio (Quinto), 125n(32)
Sesto Empirico, 53n(13), 85n(32), 102n(93), 107n(110, 111), 144n(107), 166n(18), 178n(92, 93), 204n(17), 212n(45), 213n(46), 215n(54), 217n(62), 221n(73), 222-223, 233, 238-241, 253n(68), 303n(62)
Sforza Ludovico, 293
Silla (Lucio Cornelio), 225n(15)
Simplicio, 38n(33), 97n(69), 101, 101n(90), 105n(102), 124n(27), 203n(10, 11), 252, 252n(64), 255-256, 285-286, 302, 302n(59), 303, 303n(61), 321
Singer Charles, 40, 120
Snell Bruno, 204n(15)
Snell Willebrord, 245n(40), 300, 300n(52)
Socrate, 38n(31)
Solmsen Friedrich, 155n(4), 203n(12)
Sosio Libero, 312n(91)
Speusippo, 172
von Staden Heinrich, 154, 154n(1), 155n(5), 156n(8, 9), 157n(10), 158n(12, 13), 160, 160n(18, 19), 162n(24), 164n(10, 11), 165n(32, 33, 36, 37), 166n(38, 41), 167n(42), 168n(44, 46), 169n(51), 182n(15), 203n(11), 210n(35, 36), 295n(36), 296n(37)
Stahl William H., 226n(19)
Stamatis Evangelos S., 55n(18)
Stein W., 92n(57)

Stephanus H. (*Henri Ètienne*), 311n(90)
Stevin Simon, 330
Stobeo Giovanni, 97n(69), 112, 112n(124), 217n(62)
Strabone, 90n(51, 53), 124n(30), 125n(31, 33, 34), 126n(37), 127n(41), 140n(93), 143n(103), 147, 147n(124), 150, 172, 172n(61, 62), 182, 182n(17), 184, 184n(21, 22), 192, 192n(62), 195, 195n(75, 76), 205, 205n(21), 245, 245n(42), 247n(49), 248, 248n(53), 249, 249n(55), 258, 258n(87), 261n(103), 273n(127), 275, 275n(134), 276, 276n(136, 138), 277n(144), 278, 278n(147), 284n(172), 293n(31), 311, 313, 313n(98)
Stratone di Lampsaco, 25, 97-98, 146, 252, 252n(65)
Sulpicio Gallo, 104n(98)
Suter Heinrich, 145n(112)
Svetonio Tranquillo, 199n(91)
Szabó Árpád, 52n(10)

Taccola Mariano, 291, 291n(23, 24)
Talete, 41, 51, 52, 124n(27)
Tarn William W., 134, 134n(66)
Taylor E.G.R., 245n(40), 294n(32)
Teodorico di Freiburg, 299, 299n(49)
Teodoro (ingegnere ellenistico), 186
Teodosio di Bitinia, 78, 78n(73), 335n(155)
Teofilo (patriarca di Alessandria), 234
Teofrasto, 72n(57), 102, 152, 152n(139), 170-171, 187-188, 224, 226
Teone di Alessandria, 29, 83, 83n(18), 84, 84n(26), 237n(12)
Teone di Smirne, 283, 283n(169, 170), 309, 309n(82)
Tiberio, imperatore, 216n(59), 281
Tirannione il Vecchio, 225n(15)
Todd Robert B., 85n(32), 88n(47)
Toeplitz O., 92n(57)
Tölle-Kastenbein Renate, 130n(50), 133n(61), 145n(113), 205n(20)
Tolomeo (Claudio), 27n(10), 29, 46, 47, 47n(47), 48, 59n(28), 78, 78n(72), 85-86, 90-91, 100, 100n(84), 101n(87), 105, 107, 107n(108), 109-111, 124, 124n(25, 29), 129n(47), 146n(123), 147, 147n(125), 151, 153, 209, 250, 255n(73), 259-262, 265, 279-283, 287, 287n(7), 288, 293, 294, 295, 299-300, 301, 315, 323, 331, 334n(151)
Tolomeo I (Sotèr), 27, 205, 219n(66)
Tolomeo II (Filadelfo), 27, 27n(10), 126, 158n(12), 180, 180n(3), 182, 183, 184, 186, 188, 194, 198
Tolomeo III (Evergete I), 186
Tolomeo IV (Filopatore), 168
Tolomeo VIII (Evergete II), 28, 91n(56), 124n(30), 224
Toomer G. J, 28n(12), 83n(21), 84n(22, 23, 25), 100n(86), 101n(87), 124n(29), 146n(122), 287n(5)
Torelli J., 178n(93), 296n(40)
Torraca L., 255n(74)
Torricelli Evangelista, 332
Tubia (sceicco della Transgiordania, vassallo dei Tolomei), 188
Tzetzes Joannes, 127n(38)

Usher A.P., 304n(67)

Valerio Massimo, 28n(15)
Van Helmont Jan Baptist, 305, 305n(71)
Varrone (Marco Terenzio), 24, 185, 185n(25), 188n(38), 189, 189n(48), 190n(49), 226-227
Ver Eecke Paul, 160n(17)
Vesalio Andrea (*André Vésale*), 295

Vespasiano, imperatore, 196, 199
Villard de Honnecourt, 289, 289n(16)
Virgilio Marone (Publio), 225
Vitruvio Pollione (Marco), 24, 71, 80, 80n(5, 7), 87, 87n(46), 121, 121n(15), 130, 130n(51), 132, 132n(59, 60), 133, 134n(67, 38), 137n(82), 140, 140n(95), 141, 141n(97), 146, 146n(119), 175, 175n(81), 220n(70), 221n(74), 225n(13), 229-230, 265-272, 291, 291n(23), 293, 293n(29), 307n(76), 309, 309n(82), 321, 326, 327
Viviani Vincenzo, 306n(75)
Vogel K., 286n(5), 289n(13)
Vogt Heinrich, 260, 260n(100)
Voltaire, 333, 333n(148)

van der Waerden Bartel Leendert, 30n(21)
Wallis John, 322, 322n(117)
Walzer R., 164n(30)
Weber C.W., 231n(38)
Wehrli F., 89n(50)
Weierstrass Karl Theodor Wilhelm, 64, 64n(39), 75, 214, 337
Westermann William Linn, 200, 200n(97)
Wittfogel K.A., 42n(40)
Wolf Friedrich August, 215n(53)
Woodbury R.S., 133n(62)
Wren Christopher, 325

Yates Frances A., 325n(126)
Young Thomas, 333

Zeller Eduard, 251n(59)
Zenobia (Settimia), regina di Palmira, 225n(16)
Zenone di Elea, 52, 52n(11), 53, 54, 56, 204n(15)
Zenone (amministratore), 179, 180, 180n(3), 193n(64), 194, 199
Zeuthen Hieronymus Georg, 73n (61)
Ziggelaar August, 299n(49), 314n(101)
Zoroastro, 184n(23)
Zosimo di Panopoli, 174-175, 176

Indice

Pag. 7 Prefazione *di Marcello Cini*

17 Introduzione

20 Ringraziamenti

21 1. La nascita della scienza

21 *1.1. La rimozione della rivoluzione scientifica*
26 *1.2. L'ellenismo*
30 *1.3. La scienza*
36 *1.4. Vi era "scienza" nella Grecia classica?*
39 *1.5. Origini della scienza ellenistica*
42 *1.6. È esistita una "fisica" ellenistica?*

49 2. La matematica ellenistica

49 *2.1. Precedenti della scienza matematica*
56 *2.2. Il metodo assiomatico-deduttivo*
57 *2.3. L'algebra geometrica*
61 *2.4. La matematica del discreto e il concetto di infinito*
62 *2.5. La matematica del continuo*
65 *2.6. Euclide e i suoi predecessori del IV secolo a.C.*
67 *2.7. Un'applicazione del "metodo di esaustione"*
71 *2.8. Il "costruttivismo" della matematica ellenistica*
75 *2.9. La trigonometria e la geometria sferica*

79 3. Alcune altre teorie scientifiche ellenistiche

79 *3.1. L'ottica*

87 *3.2. Il rilevamento, la topografia e la geodesia*
89 *3.3. La geografia matematica e la cartografia*
91 *3.4. La meccanica*
94 *3.5. L'idrostatica*
97 *3.6. La pneumatica*
99 *3.7. L'astronomia ellenistica e l'eliocentrismo di Aristarco*
105 *3.8. Moti della Terra e relatività del moto*
109 *3.9. L'astronomia di Tolomeo*
111 *3.10. Alcune osservazioni sulla matematica applicata*

117 4. La tecnologia scientifica

117 *4.1. Ingegneria meccanica*
119 *4.2. Strumentazione*
123 *4.3. Tecniche di navigazione*
125 *4.4. Ingegneria navale. Il Faro*
130 *4.5. Ingegneria idraulica e pneumatica*
133 *4.6. La tecnologia militare*
139 *4.7. La macchina di Anticitera*
140 *4.8. Fonti naturali di energia*
144 *4.9. La tecnologia descritta da Erone*
150 *4.10. La tecnologia perduta*

154 5. Le scienze mediche e le altre scienze empiriche

154 *5.1. La nascita dell'anatomia e della fisiologia*
156 *5.2. Rapporti tra medicina e scienza esatta*
160 *5.3. La nomenclatura anatomica e la pressa a vite*
161 *5.4. La metodologia scientifica in medicina*
167 *5.5. Sviluppo e fine della medicina scientifica*
170 *5.6. Botanica e zoologia*
174 *5.7. La chimica*

179 6. Economia e tecniche produttive

179 *6.1. La politica economica e culturale dei sovrani ellenistici*
185 *6.2. La tecnologia produttiva*
195 *6.3. I risultati economici*
198 *6.4. Scienza, tecnologia e schiavitù*

201 7. Altri aspetti della rivoluzione scientifica

201 *7.1. Aspetti ideologici*
205 *7.2. L'urbanistica*

207 *7.3. La psicoanalisi*
212 *7.4. La logica proposizionale*
215 *7.5. Gli studi filologici e linguistici*
218 *7.6. Arti figurative, letteratura e musica*

222 8. Decadenza e fine della scienza

222 *8.1. La crisi della scienza ellenistica*
226 *8.2. I Romani, la scienza e la tecnologia scientifica*
233 *8.3. La fine della scienza antica*

235 9. La scienza perduta

235 *9.1. Le prime definizioni degli Elementi* di Euclide
244 *9.2. La misura di Eratostene del meridiano terrestre*
251 *9.3. Il principio di inerzia*
257 *9.4. La forma della Terra. Fionda o ellissoide?*
259 *9.5. Tolomeo e l'astronomia ellenistica*
262 *9.6. Un brano di Seneca*
265 *9.7. Raggi di buio e raggi triangolari*
272 *9.8. L'idea di gravità da Aristotele a Ipparco*
279 *9.9. Precessione, comete e altro*
281 *9.10. Tolomeo e Teone di Smirne*

285 10. Il lentissimo recupero

285 *10.1. I "rinascimenti"*
290 *10.2. Il Rinascimento*
298 *10.3. La riscoperta europea dell'ottica*
300 *10.4. Un lontano discepolo di Archimede*
307 *10.5. Due scienziati moderni: Keplero e Descartes*
311 *10.6. Moti della Terra, maree e gravitazione*
314 *10.7. La filosofia naturale di Newton*
328 *10.8. Scienza antica e scienza moderna*
331 *10.9. La rimozione della scienza antica*
334 *10.10. Recupero (e crisi) della metodologia scientifica*

339 Epilogo

343 Appendice

347 Elenco delle fonti

359 Abbreviazioni bibliografiche

369 Indice dei nomi